



**DÍDIMO OLAVO DAS
NEVES SANTOS**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES
UTILIZANDO PROTOTIPAGEM POR EXTRUSÃO**



**DÍDIMO OLAVO DAS
NEVES SANTOS**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES
UTILIZANDO PROTOTIPAGEM POR EXTRUSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Paulo Jorge Silva Bártolo, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria e co-orientação do professor Doutor José António de Oliveira Simões, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Dr. António José Vilela Pontes
Professor Associado da Universidade do Minho

Prof. Dr. Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Paulo Jorge Silva Bártolo
Professor Coordenador do Instituto Politécnico de Leiria

Prof. Dr. José António de Oliveira Simões
Professor Associado da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A realização deste trabalho foi possível devido à colaboração de diversas pessoas e instituições, a quem gostaria de apresentar os meus sinceros agradecimentos.

Aos Doutores Paulo Bártolo e José Simões, orientadores científicos deste trabalho, e em particular ao Doutor Paulo Bártolo por todo o fortíssimo apoio concedido na realização deste trabalho.

À Doutora Fátima Barreiros por todo o apoio quer pessoal quer técnico, de forma a tornar realizável esta investigação. O seu Apoio foi fundamental ao nível da caracterização e preparação das misturas utilizadas nesta investigação.

Aos Engenheiros Luís Oliveira, Carlos Mota e Artur Mateus por toda a ajuda na construção da plataforma de extrusão. Ao Doutor Carlos Capela por todo o apoio e disponibilidade.

Ao Instituto Pedro Nunes (IPN) pela cedência das instalações e equipamentos para a preparação das misturas, assim como na execução de testes e na cedência do ligante. A este respeito um agradecimento muito especial à Doutora Teresa Vieira.

À Universidade do Minho pela realização de micrografias (SEM) a diversos materiais.

À ALCOA pela cedência gratuita dos materiais cerâmicos e apoio técnico.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria do Instituto Politécnico de Leiria pela cedência das instalações, equipamentos e materiais para construção da plataforma de extrusão e realização de diversos ensaios.

Aos departamentos de Mecânica e Electrotecnia da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria pelo apoio técnico e material na realização deste estudo.

A todos os meus amigos que pontualmente me ajudaram nalgumas fases do trabalho.

À minha família por todo o apoio e compreensão durante a realização do estudo, interagindo como estímulo.

À minha Esposa pela paciência e ajuda incontestável quer na realização do estudo quer na realização do relatório, assim como fonte de encorajamento e energia para continuar.

À minha filha que apesar de ainda não ter idade para compreender, a ausência em certas alturas do pai e os sorrisos como estímulo.

A todos o meu grande Obrigado.

palavras-chave

Tecnologia, Prototipagem Rápida, Extrusão, Matéria-prima, Protótipos.

resumo

O processo Fused Deposition of Ceramic (FDC) é uma técnica de produção de componentes cerâmicos, baseada na extrusão de filamentos cerâmico/ligante camada a camada. O material a extrudir deve conter uma alta percentagem de carga cerâmica de modo a reduzir contracções durante o processo térmico de eliminação de ligante, sem comprometer as características reológicas durante a extrusão. Com este trabalho de investigação pretende-se desenvolver um sistema alternativo ao processo FDC que use um material que não se apresente sobre a forma de filamento. Deste modo misturas sobre a forma de grânulos, previamente preparadas, são colocadas na câmara de alimentação do equipamento onde são aquecidas. Aplicação de pressão força o material a passar através de um fuso sendo depositado na área de trabalho. Várias misturas contendo diferentes composições cerâmico/ligante foram preparadas. Para tal, utilizaram-se dois tipos de pós de alumina de diferentes tamanhos com ceras poliolefinicas, para a optimização das misturas procedeu-se a uma extensa análise experimental envolvendo análises térmicas, reológicas e morfológicas. Foi ainda desenvolvido um dispositivo de extrusão destinado a processar as diferentes misturas segundo condições de processamento pré definidas.

keywords

Technology, Rapid Prototyping, Extrusion, Raw materials, Prototypes.

abstract

Fused deposition of Ceramics (FDC) is a technique to produce ceramic components, based on the extrusion of powder/binder filaments to form layer by layer three dimensional objects. Filament materials must contain a high content of ceramic powder to prevent shrinkage on thermal treatments as debinding and sintering, without compromising adequate rheological properties during the extrusion process. This research aims at developing an alternative FDC system not requiring the use of precursor filaments. Throughout this process, material in pellet or granule form is fed into a chamber where it is softened. Pressure forces the material down a chamber and out through a nozzle tip. In this work, feedstocks containing different ceramic/binder compositions were prepared. Two kinds of alumina powders with different particle size characteristics were used and mixed with a commercial binder based on polyolefin waxes. Thermal and rheological analyses together with scanning electron microscopy were used to characterize the feedstocks, as well to select both the optimized feedstock and processing conditions. It was also developed a experimental extrusion apparatus to process de feedstocks under predefined processing conditions.

Índice Geral

1. CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 - INTRODUÇÃO	1
1.2 - OBJECTIVOS E ESTRUTURA DA TESE	1
2. CAPÍTULO 2: PROCESSOS DE PROTÓTIPOAGEM RÁPIDA	5
2.1 - INTRODUÇÃO	5
2.2 - ETAPAS ASSOCIADAS À CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS POR PROTÓTIPOAGEM RÁPIDA	8
2.3 - PROCESSOS DE PROTÓTIPOAGEM RÁPIDA	17
2.3.1 - <i>Processos Estereolitográficos</i>	17
2.3.2 - <i>Processos de Laminagem</i>	20
2.3.3 - <i>Sinterização selectiva por laser</i>	22
2.3.4 - <i>Processos de impressão</i>	26
2.3.5 - <i>Processos de Extrusão</i>	29
2.4 - CONCLUSÕES	32
3. CAPÍTULO 3: MATERIAIS E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	33
3.1 - INTRODUÇÃO	33
3.2 - MISTURAS CERÂMICAS PARA EXTRUSÃO	33
3.2.1 - <i>Material cerâmico</i>	34
3.2.1.1 - Caracterização dos pós de alumina	34
3.2.1.1.1 - Determinação da densidade batida e densidade real	35
3.2.1.1.2 - Tamanho e distribuição de tamanho das partículas	37
3.2.1.1.3 - Análise morfológica das partículas	39
3.2.1.1.4 - Análise estrutural dos pós de alumina	40
3.2.1.1.5 - Análise térmica	41
3.2.2 - <i>Ligante polimérico</i>	43
3.3 - PREPARAÇÃO DA MISTURA	45
3.3.1 - <i>Optimização do teor de pós na mistura</i>	45
3.3.2 - <i>Processo de mistura e granulação</i>	51
3.3.3 - <i>Avaliação da homogeneidade da mistura</i>	53
4. CAPÍTULO 4: FABRICO DA PLATAFORMA DE EXTRUSÃO E RESULTADOS	57
4.1 - INTRODUÇÃO	57
4.2 - PLATAFORMA DE EXTRUSÃO	57
4.3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	69
4.3.1 - <i>Condições de processamento</i>	69
4.3.1.1 - Avaliação do comportamento das misturas	70

4.3.1.2 - Análise da morfologia dos filamentos extrudidos	73
5. CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....	83
5.1 - CONCLUSÕES	83
5.2 - TRABALHOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS	87
ANEXOS	93

Índice de figuras

Figura 2.1: Classificação dos processos de protótipagem rápida quanto ao material utilizado.	9
Figura 2.2: Etapas associadas ao processo de obtenção de modelos por protótipagem rápida.	9
Figura 2.3: Modelo de CAD 3D.	10
Figura 2.4: Modelo em formato STL.	10
Figura 2.5: Estrutura típica de um ficheiro STL em ASCII.	11
Figura 2.6: Estrutura de um ficheiro STL em binário.	12
Figura 2.7: Identificação da informação redundante de uma malha STL. O nó central é definido 4 vezes, cada nó dos vértices da rede é definido 2 vezes.	13
Figura 2.8: Erros em ficheiros STL.	13
Figura 2.9: Ficheiro SLI (Planos de seccionamento).	14
Figura 2.10: Construção do modelo por montagem das sucessivas camadas seccionadas.	15
Figura 2.11: Efeito escada em função da espessura da camada. A) Espessura pequena da camada, B) Espessura grande da camada.	16
Figura 2.12: Diferentes resultados obtidos dependentes da orientação de construção e operações de pós-processamento.	16
Figura 2.13: Estereolitografia.	18
Figura 2.14: Produção de protótipos por estereolitografia e sua utilização para a produção de ferramentas de produção e protótipos funcionais através de técnicas de fabrico rápido (rapid tooling).	19
Figura 2.15: a) Esquema de uma máquina de LOM; b) Esquema do processo LOM.	21
Figura 2.16: Remoção do material envolvente, desvendando a peça fabricada.	22
Figura 2.17: Processo de sintetização selectiva por laser.	24
Figura 2.18: Remoção e limpeza dos protótipos.	25
Figura 2.19: Influência dos principais parâmetros de construção no processo SLS.	26
Figura 2.20: Princípio de construção de modelos através do processo de impressão 3D.	28
Figura 2.21: Funcionamento de um sistema do tipo Thermojet.	28
Figura 2.22: Sistema FDM.	30
Figura 2.23: Estratégias de preenchimento das camadas do processo FDM: (a) preenchimento tipo raster; (b) preenchimento tipo contour; (c) preenchimento raster e contour e (d) alternância da direcção do preenchimento raster.	30
Figura 3.1: Distribuição granulométrica das partículas de alumina CT 1200 SG.	38
Figura 3.2: Distribuição granulométrica das partículas de alumina CT 3000 SG.	38
Figura 3.3: Morfologia das partículas de alumina 1200 SG: (a) Ampliação de 1000X; (b) Ampliação de 5000X.	40
Figura 3.4: Morfologia das partículas de alumina 3000 SG: (a) Ampliação de 1000X; (b) Ampliação de 5000X.	40
Figura 3.5: Difractograma de raios X dos pós de alumina (Barreiros, 2002).	41
Figura 3.6: Equipamento TG/DSC Staton Redcroft PL-STA 1500.	42

Figura 3.7: Análise termogravimétrica (TG) e de calorimetria diferencial de varrimento (DSC) dos pós de alumina (Barreiros, 2002).....	43
Figura 3.8: Ligante Licomont TP EK 583.	44
Figura 3.9: Calorimetria diferencial de varrimento do ligante.	44
Figura 3.10: Reómetro de Binário (Misturadora Plastograph Brabender).	47
Figura 3.11: Binário em função do tempo de mistura para várias concentrações de pós da alumina CT 1200 SG e CT 3000 SG, a 60 rpm e 160°C.	49
Figura 3.12: Binário em função da concentração de pós da alumina 1200.	49
Figura 3.13: Binário em função da concentração de pós da alumina 3000.	50
Figura 3.14: Misturadora Z-BLADE.	52
Figura 3.15: Processo de mistura na câmara da misturadora Z-BLADE.	53
Figura 3.16: Granulação da mistura na câmara da misturadora Z-BLADE.	53
Figura 3.17: Micrografias da superfície de fractura das misturas de alumina 1200 SG: a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60% (ampliação 5000X).	55
Figura 3.18: Micrografias da superfície de fractura das misturas de alumina 3000 SG: a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58% (ampliação 5000X)	56
Figura 4.1: Esboço do equipamento e alguns detalhes.	58
Figura 4.2: Modelação 3D da plataforma.	59
Figura 4.3: Modelação 3D da unidade de extrusão.	59
Figura 4.4: Câmara de deposição das misturas e fieira.	60
Figura 4.5: Resistências anelares e termopares colocados na câmara.	61
Figura 4.6: Controlador de temperatura.	61
Figura 4.7: Cilindro acoplado à câmara.	62
Figura 4.8: Válvula 2/3 usada controlar a entrada de ar no cilindro.	62
Figura 4.9: Extrusora.	63
Figura 4.10: Unidade de extrusão.	63
Figura 4.11: Perfis de alumínio BOSCH utilizados na construção da plataforma.	64
Figura 4.12: Sistema de polias com correias.	65
Figura 4.13: Drivers de controlo de motores DC.	66
Figura 4.14: Placa de leitura de encoders.	67
Figura 4.15: Placa de controlo de motores e fim-de-curso.	67
Figura 4.16: Quadro de controlo.	67
Figura 4.17: Plataforma móvel.	68
Figura 4.18: Plataforma de extrusão.	69
Figura 4.19: Estrutura obtida por extrusão da mistura 3000-54%.	71
Figura 4.20: Extrusão da mistura 3000-56%.	71
Figura 4.21: Extrusão da mistura 3000-58%.	71
Figura 4.22: Estrutura obtida por extrusão da mistura 1200-56%.	72
Figura 4.23: Estrutura obtida por extrusão da mistura 1200-60%.	72

Figura 4.24: Micrografias da superfície dos filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60%. Ampliação 70X.	74
Figura 4.25: Micrografias da superfície dos filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60%. Ampliação 1000X.	75
Figura 4.26: Micrografias da superfície dos filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58%. Ampliação 70X.	76
Figura 4.27: Micrografias da superfície dos filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58%. Ampliação 1000X.	77
Figura 4.28: Micrografias da zona de fractura de filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60%. Ampliação 100X.	78
Figura 4.29: Micrografias da zona de fractura de filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60%. Ampliação 1000X.	79
Figura 4.30: Micrografias da zona de fractura de filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58%. Ampliação 100X.	80
Figura 4.31: Micrografias da zona de fractura de filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58%. Ampliação 1000X.	81

Índice de tabelas

Tabela 2.1: Principais vantagens e desvantagens do processo de Estereolitografia.	20
Tabela 2.2: Principais vantagens e desvantagens do processo de laminagem	23
Tabela 2.3: Principais vantagens e desvantagens do processo SLS.....	27
Tabela 2.4: Principais vantagens e desvantagens do processo de Impressão 3D.....	29
Tabela 2.5: Principais vantagens e desvantagens do processo FDM.....	32
Tabela 3.1: Composição química das aluminas.....	35
Tabela 3.2: Densidade batida e densidade real dos pós de alumina.	36
Tabela 3.3: Valores dos diâmetros percentuais d10, d50, d90 e da moda, obtidos das curvas granulométricas.	39
Tabela 3.4: Valores médios de perda de massa e concentração de pós para as diferentes misturas.	54
Tabela 4.1: Condições de processamento.	70
Tabela 4.2: Densidade teórica e aparente de filamentos extrudidos a partir de misturas contendo alumina CT1200SG.....	82

CAPITULO 1:

INTRODUÇÃO

1.1 - Introdução

O processo prototipagem rápida por extrusão, desenvolvido por Scott Crump (1989) sob a designação de *Fused Deposition Modelling* (FDM), é actualmente, de acordo com o relatório anual do consultor Terry Wohlers, o mais importante processo de prototipagem rápida (ver Capítulo 2). Este processo consiste na extrusão de finos filamentos de material, aquecidos ligeiramente acima da sua temperatura de fusão. O material fundido é em seguida extrudido através de uma cabeça robotizada e depositado no local pretendido com auxílio de um controlador computadorizado.

A prototipagem por extrusão apresenta contudo algumas importantes limitações nomeadamente em termos de:

- reduzida gama de materiais utilizados (essencialmente termoplásticos);
- necessidade de utilizar materiais sob a forma de fio o que condiciona a precisão dimensional dos objectos obtidos.

Este projecto de investigação visa explorar novas estratégias de fabricação utilizando os princípios da extrusão convencional de plásticos, de modo a tornar mais flexíveis os actuais sistemas de protótipagem por extrusão, através da utilização de uma gama mais alargada de materiais. Tal passa pela utilização de misturas granuladas de materiais inorgânicos e orgânicos, o que permite alargar o campo de utilização destes sistemas (ver Capítulo 3).

1.2 - Objectivos e estrutura da tese

De acordo com o exposto anteriormente, os principais objectivos desta dissertação são:

- Efectuar um levantamento das tecnologias de protótipagem rápida, identificando as suas vantagens e limitações;
- Definir e caracterizar as etapas associadas à produção de componentes cerâmicos através de técnicas aditivas de extrusão;
- Seleccionar e caracterizar materiais destinados à produção de protótipos cerâmicos e estabelecer critérios fundamentais para a selecção de misturas de pós cerâmicos/ligante;
- Desenvolver uma plataforma destinada à produção de componentes cerâmicos através de técnicas aditivas de extrusão;
- Validar o processo desenvolvido através da produção de pequenos componentes cerâmicos.

Em consonância, foi decidido estruturar a tese em seis capítulos que descrevem de forma detalhada o trabalho teórico e experimental desenvolvido. O primeiro capítulo introduz o tema de dissertação e apresenta os principais objectivos deste trabalho.

Capítulo 2: Processos de Protótipagem Rápida

Neste capítulo faz-se uma revisão do estado da arte dos processos de protótipagem rápida actualmente existentes. Descrevem-se, de forma geral, os principais processos de protótipagem rápida indicando-se os materiais utilizados e as principais vantagens e desvantagens. Os processos de extrusão, que constituem a tecnologia de protótipagem rápida estudada neste trabalho de investigação, são analisados de forma detalhada.

Capítulo 3: Materiais e Técnicas de Caracterização

Neste capítulo descreve-se o processo de obtenção das misturas, descrevendo e caracterizando pormenorizadamente os seus constituintes, em termos de composição química, densidades, tamanho e distribuição de tamanho das partículas, morfologia das partículas e análise térmica. A optimização do teor de pós na mistura é igualmente

analisada. As diferentes técnicas de caracterização são introduzidas e apresentadas de forma detalhada.

Capítulo 4: Fabrico da Plataforma de Extrusão e Resultados

Este capítulo descreve o trabalho de concepção e fabrico da plataforma de extrusão de pastas cerâmicas. São igualmente apresentadas algumas estruturas de geometria simples produzidas e avaliados os aspectos relacionados com as condições de processamento e a influência que sobre estas condições tem a composição da mistura. A influência da composição da mistura em termos das morfologias das estruturas obtidas é igualmente objecto de análise.

Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo pretende fazer um sumário abrangente de toda a tese. O capítulo começa com a apresentação das principais conclusões decorrentes do trabalho desenvolvido e termina com a apresentação de propostas para trabalhos de investigação de desenvolvimento futuro.

CAPITULO 2:

PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

2.1 - Introdução

Nos últimos anos, a intensificação da concorrência, aliada à crescente complexidade dos produtos fabricados, tem exigido das empresas alterações substanciais no processo de desenvolvimento de produtos, visando reduzir o tempo total de desenvolvimento, juntamente com o aumento da qualidade e competitividade (Ibusuki e Kaminski, 2006; Carrillo e Franza, 2006). Estas alterações envolvem tanto aspectos de gestão do processo de desenvolvimento, como também a utilização de novas técnicas e ferramentas computacionais para o projecto, análise, simulação e optimização dos componentes fabricados (Alisantoso *et al*, 2006). Muitas vezes, a garantia de sucesso comercial de um produto está associada à habilidade da empresa em identificar as necessidades dos clientes, desenvolvendo em seguida produtos que atendam satisfatoriamente essas necessidades.

A redução do tempo de lançamento de produtos melhor adaptados às necessidades do mercado constitui outro aspecto fundamental para o desenvolvimento industrial. A aposta na concepção e fabrico de novos produtos é, assim, uma realidade nas mais modernas economias.

Actualmente, qualquer projecto de produção de um determinado produto envolve, em geral, dois tipos de tarefas de concepção (Chua *et al*, 2003):

- concepção do produto final que se pretende fabricar;
- concepção dos processos tecnológicos que possibilitarão a obtenção do produto.

Sendo, por isso mesmo, importante a existência de ferramentas de apoio a estas actividades, de modo, a permitirem às empresas um aumento da qualidade dos produtos fabricados, uma redução de custos e uma diminuição dos tempos de desenvolvimento.

O desenvolvimento do produto pode surgir, como se sabe, de uma ideia original ou da adaptação de um produto existente. No primeiro caso o projectista, necessita de uma ferramenta que lhe permita esboçar uma forma o mais intuitivamente possível, e, sobre ela aplicar sucessivas alterações, alterando parcial ou totalmente o objecto inicialmente criado. Nesta fase, as ferramentas de modelação são de relativa importância e deverão permitir a criação de formas complexas, de um modo interactivo. No segundo caso, o projectista toma como ponto de partida um modelo existente, que vai sofrer sucessivas alterações visuais e/ou funcionais, de modo a preencher os requisitos do novo produto.

Estes modelos computacionais podem ser utilizados directamente pelos diversos departamentos de engenharia de uma empresa em processos de simulação, análise, optimização, fabrico e controlo assistidos por computador. Podem igualmente ser utilizados na obtenção de modelos físicos através de tecnologias de fabrico rápido de protótipos, possibilitando ao projectista materializar as suas ideias de modo a poderem ser facilmente apreendidas e partilhadas pelos restantes elementos pertencentes às equipas de desenvolvimento, fabrico, análise e produção.

Se pensarmos que a fase de projecto envolve pessoas com formações e visões bastante diferentes (gestores, projectistas, moldistas, etc.), compreende-se que a existência de modelos físicos ou protótipos funcionam como agentes catalisadores do diálogo entre equipas. Servem igualmente como modelos para verificação e validação de ideias e objectivos, e podem ser utilizados para análises estéticas, ergonómicas e de funcionalidade, ou servir como pré-formas para fundição, electroformação, moldação por vácuo, etc (Grimm, 2004; Chua *et al*, 2003).

Nas últimas décadas têm ocorrido profundas alterações tecnológicas em termos industriais, particularmente, nas áreas da computação e gestão de informação. Actualmente, engenheiros, *designers* e técnicos associados às mais diversas áreas do desenvolvimento do produto usam várias tecnologias assistidas por computador para a avaliação do processo de desenvolvimento, através da geração, manipulação e optimização de modelos gerados em ambiente virtual (protótipos virtuais). Estas técnicas compreendem (Macmahon e Browne, 1999; Lee, 1999):

- Projecto assistido por computador (CAD);
- Fabrico assistido por computador (CAM);
- Engenharia assistida por computador (CAE).

As tecnologias assistidas por computador têm sido desenvolvidas com o objectivo de possibilitarem a utilização de sistemas computadorizados no apoio às actividades de criação e modificação de um *design* de produto. Os sistemas de modelação geométrica têm conhecido nos últimos anos um forte desenvolvimento, sendo actualmente capazes de lidar com geometrias bastante complexas e realizar montagens de componentes de um modelo. Por outro lado, os computadores possuem hoje elevada capacidade de memória e de processamento o que tem permitido o aparecimento de sistemas CAD mais fiáveis e fáceis de utilizar. Para além da modelação bidimensional (2D) e tridimensional (3D) é actualmente possível a realização de animações e a geração de modelos renderizados e foto-realísticos (Alves e Bártolo, 2008; Bártolo e Galha, 2001).

O fabrico assistido por computador diz respeito à utilização de sistemas computadorizados para apoio a operações de planeamento, gestão e controlo de processos de fabrico. Os avanços que os actuais sistemas CAM têm conhecido, assentam no desenvolvimento informático, em sistemas de controlo electrónico de elevada precisão e em sofisticados softwares. Através de sistemas CAM é possível gerar instruções de controlo numérico de modo a controlar uma máquina ferramenta de acordo com a informação previamente gerada num sistema CAD. As instruções de comando numérico são escritas em linguagens específicas, nomeadamente a APT (Automatically Programmed Tool) ou a COMPACT II.

As tecnologias de engenharia assistida por computador permitem a realização de simulações e análises de modelos previamente criados em ambiente CAD. Estes sistemas possibilitam a realização de um leque variado de análises computacionais, tais como: tensões e deformações, transferência de calor, vibrações, estudo de campos magnéticos, cinemática, etc. A grande maioria dos actuais sistemas CAE assentam no método dos elementos finitos que envolve a transformação de um problema físico complexo num modelo discreto mais simples e aproximado através da utilização de pequenas regiões designadas por elementos finitos.

Para além das tecnologias anteriormente indicadas, as duas últimas décadas conheceram um significativo desenvolvimento de técnicas sofisticadas de geração 3D de objectos físicos. Estas técnicas têm sido designadas por técnicas de prototipagem rápida (Figura 2.1) (Bidanda e Bártolo, 2008; Gibson *et al*, 2009; Grimm, 2004; Chua *et al*, 2003; Pham e Dimov, 2003). Apesar das diferentes técnicas existentes (ver secção 2.3) e dos diferentes materiais utilizados, todas elas utilizam o mesmo princípio, isto é, a transformação de um modelo geométrico CAD num modelo físico produzido camada a camada (ver secção 2.2). A principal vantagem desta tecnologia, também conhecida por técnicas de fabricação por camadas (Layer Manufacturing Techniques), reside no facto de ser possível a construção de modelos de uma só vez, independentemente da sua complexidade, não sendo necessário a geração de complexas actividades de planeamento ou sequência de processos e preparação de ferramentas.

2.2 - Etapas associadas à construção de protótipos por prototipagem rápida

Todos os processos de prototipagem rápida actualmente existentes compreendem cinco etapas fundamentais (Figura 2.2) (Soonanon e Koomsap, 2009; Gibson *et al*, 2009; Grimm, 2004; Chua *et al*, 2003; Pham e Dimov, 2003):

- Criação de um modelo CAD 3D;
- Conversão do modelo CAD num modelo STL ;
- Seccionamento do modelo STL em finas camadas transversais (formato SLI);
- Construção física do modelo, camada a camada;
- Limpeza e acabamento do modelo.

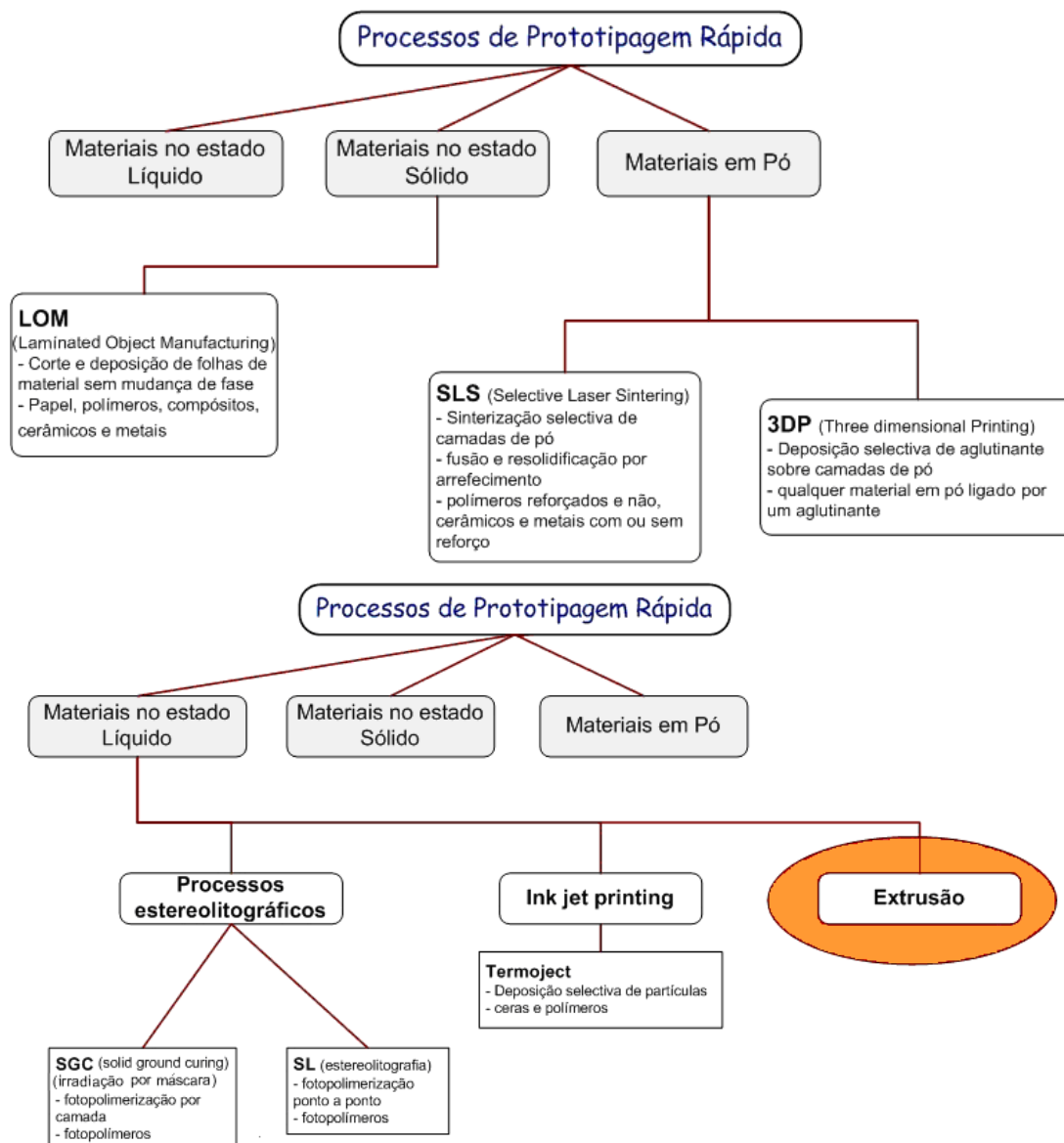


Figura 2.1: Classificação dos processos de protótipagem rápida quanto ao material utilizado.

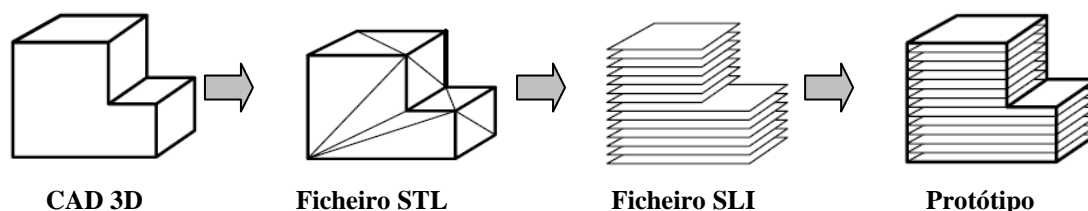


Figura 2.2: Etapas associadas ao processo de obtenção de modelos por protótipagem rápida.

A primeira etapa consiste na obtenção, através de uma aplicação de CAD, de uma representação tridimensional do objecto a ser construído (Figura 2.3).

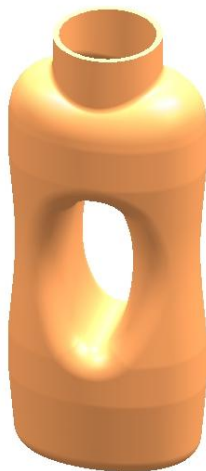


Figura 2.3: Modelo de CAD 3D.

Uma vez criado o modelo CAD este deve de ser convertido no formato STL (STereo-Lithography) em que as superfícies do modelo são descritas através de uma malha de triângulos semelhante a uma rede de elementos finitos (Figura 2.4) (Zhao *et al*, 2009; Alves e Bártolo, 2006; Ma *et al*, 2001).

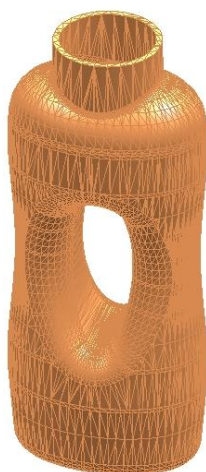


Figura 2.4: Modelo em formato STL.

Os ficheiros STL apresentam-se em dois formatos distintos (Bártolo, 2010; Alves e Bártolo, 2006; Ma *et al*, 2001):

- Binário
- ASCII

Nos ficheiros ASCII é feita a definição dos triângulos que definem as faces do modelo CAD, sendo a normal exterior a cada triângulo um vector unitário que no caso de não estar definido é gerado de uma forma automática pela maioria das aplicações informáticas existentes (Figura 2.5).

```
Solid nome
Facet normal x y z
  outer loop
    vertex x y z
    vertex x y z
    vertex x y z
  endloop
endfacet
endsolid nome
```

Figura 2.5: Estrutura típica de um ficheiro STL em ASCII.

O formato binário utiliza inteiros e vírgulas flutuantes para a representação numérica da rede triangular. Os primeiros 84 bytes são destinados ao cabeçalho e por cada triângulo existente são usados mais 50 bytes com as coordenadas em x, y e z do vector da normal e dos três vértices (Figura 2.6). Os ficheiros STL em binário são mais pequenos que os correspondentes ficheiros ASCII (Alves e Bártolo, 2006; Bártolo e Mateus, 2002).

Recentemente, e aproveitando os 2 bytes livres do ficheiro STL-Binário foi desenvolvido um novo formato que permite atribuir informação relativa à cor que cada triângulo pode ter. Esta informação consiste em atribuir a um dado triângulo cor ou não (1 ou 0) e no caso de ser especificada cor atribuir uma escala de intensidades RGB de valores compreendidas entre 0 e 31 (Bártolo e Mateus, 2002).

Bytes	Descrição
80	Cabeçalho (Ignorado)
4	Número de triângulos
Para cada triângulo	
4	Componente x da normal
4	Componente y da normal
4	Componente z da normal
4	Coordenada x do vértice 1
4	Coordenada y do vértice 1
4	Coordenada z do vértice 1
4	Coordenada x do vértice 2
4	Coordenada y do vértice 2
4	Coordenada z do vértice 2
4	Coordenada x do vértice 3
4	Coordenada y do vértice 3
4	Coordenada z do vértice 3
2	Bytes livres

Figura 2.6: Estrutura de um ficheiro STL em binário.

Um dos grandes problemas dos ficheiros STL reside na sua dimensão, resultante da existência de informação redundante (Figura 2.7) (Chua *et al*, 2003; Bártolo e Mateus, 2002). Deste modo os ficheiros STL são em regra 1.5 a 3 vezes maiores que os ficheiros CAD correspondentes. De notar que, quanto maior for o número de triângulos utilizado na definição do modelo, mais precisa será a sua definição mas, maior será o tempo de construção.

Após a definição do ficheiro STL deve proceder-se à sua análise, validação e reparação, uma vez que a frequência com que os ficheiros STL são incorrectamente gerados é elevada, sendo igualmente numerosos os erros possíveis de ocorrer como se mostra na Figura 2.8 (Gibson *et al*, 2009; Yau *et al*, 2003; Ma *et al*, 2001). Efectivamente, os

modelos podem conter lacunas devido à falta de triângulos definidores da superfície, os triângulos podem interceptar-se em locais incorrectos, podem existir faces sobrepostas, etc. As razões para estes erros estão relacionadas com a aplicação que gerou o ficheiro STL com a aplicação que gerou o modelo original em CAD 3D, ou a erros cometidos pelo utilizador.

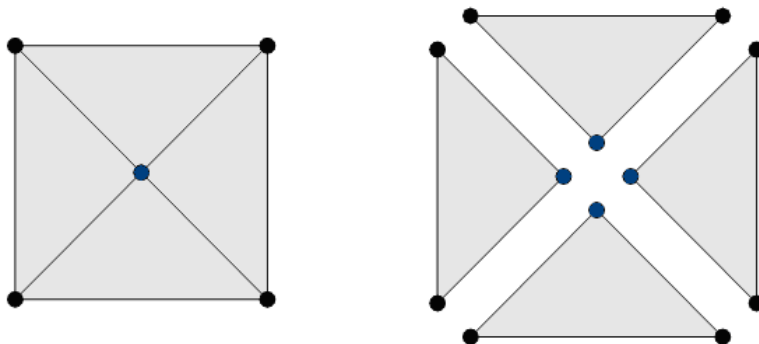


Figura 2.7: Identificação da informação redundante de uma malha STL. O nó central é definido 4 vezes, cada nó dos vértices da rede é definido 2 vezes.

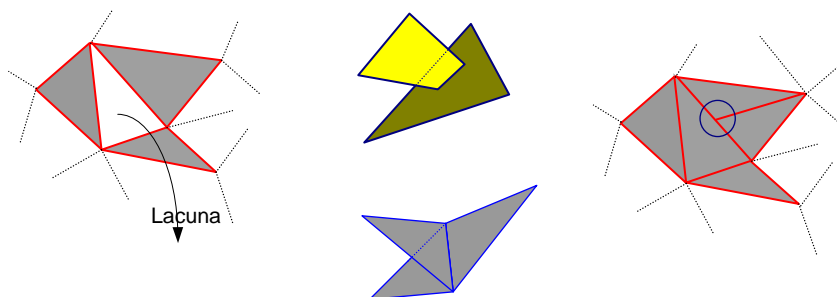


Figura 2.8: Erros em ficheiros STL.

No sentido de se contornarem os problemas associados aos ficheiros STL têm sido propostos modelos alternativos, nomeadamente, através da utilização directa dos formatos IGES ou HPGL, da utilização directa de dados obtidos por tomografia computadorizada, ou do desenvolvimento de novos formatos tais como, os formatos CFL (Cubital Facet List) ou SLC (Stereolithographic Contour) (Chua *et al*, 2003; Chua *et al*, 1997). A complexidade dos dados envolvidos ou dos algoritmos de processamento da informação para protótipagem rápida tem contudo limitado a utilização destas estratégias alternativas.

Após a obtenção do ficheiro STL válido, o modelo 3D é seccionado em finas camadas paralelas entre si e perpendiculares ao eixo de construção Z, formando o ficheiro SLI (Figura 2.9).

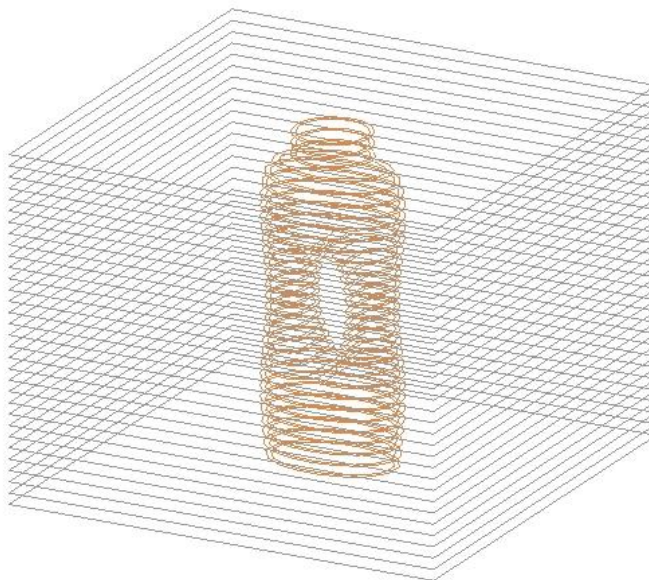


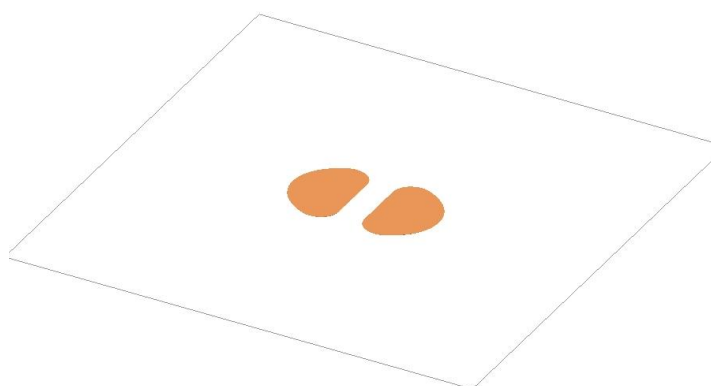
Figura 2.9: Ficheiro SLI (Planos de seccionamento).

A informação contida neste ficheiro permite a construção através de uma montagem camada a camada do protótipo final (Figura 2.10). Também nesta fase, dependendo da técnica a usar, o software define a localização de suportes quando necessários. Os suportes estruturais são usados para fixar o modelo à plataforma elevatória de construção possibilitando assim, a remoção sem danificação do protótipo final. Permitem igualmente compensar qualquer desalinhamento angular existente entre a plataforma de construção e a superfície de cada camada e reduzir o risco de empenos e distorções (Bártolo, 2001).

Muito embora, qualquer processo de fabrico seja um processo aproximado, os processos de prototipagem rápida são do ponto de vista da precisão dimensional, em regra, menos precisos que os processos substractivos convencionais. Alguns dos erros inerentes a estes processos são (Yau *et al*, 2003; Ma *et al*, 2001):

- Erros de resolução;
- Erros devido à existência de um número insuficiente de triângulos na definição do formato STL;

- Erros associados à existência de uma malha inadequada de triângulos;
- Erros de pós-processamento (empenos, contracções etc.);
- Erros devido à espessura das camadas.



Camada seccionada.

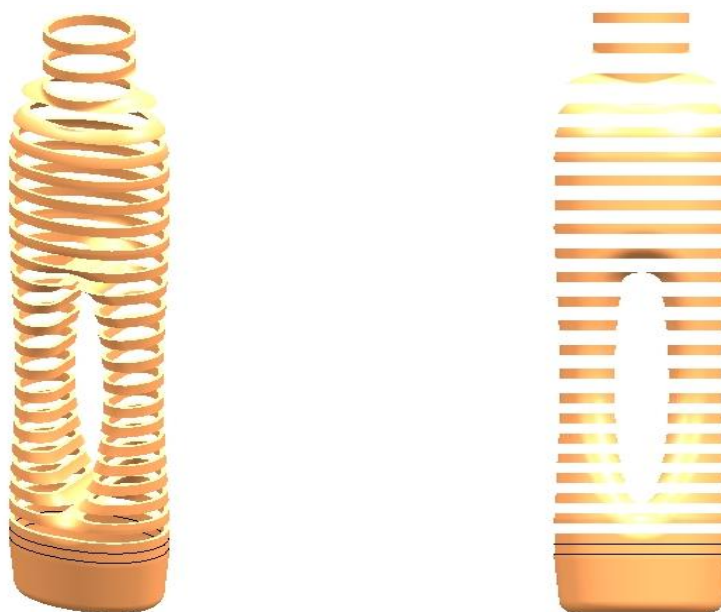


Figura 2.10: Construção do modelo por montagem das sucessivas camadas seccionadas.

À criação de objectos por camadas está vulgarmente associado uma estrutura tipo “escada”, como se mostra na figura 2.11 (Bártolo e Mateus, 2002).

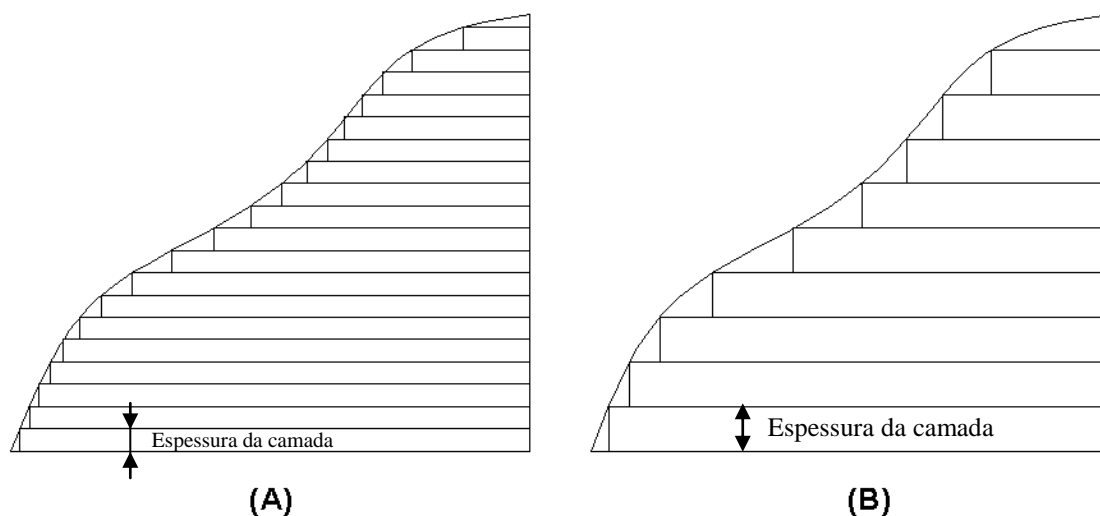


Figura 2.11: Efeito escada em função da espessura da camada. A) Espessura pequena da camada, B) Espessura grande da camada.

Quanto mais finas forem as camadas, menor será o efeito escada mas maior será o tempo de construção (Chua *et al*, 2003). Para reduzir este efeito são realizadas geralmente operações de acabamento superficial do modelo final. Para além disso, são igualmente realizadas outras operações de pós-processamento, nomeadamente, pintura da superfície da peça e remoção de suportes quando necessário. Uma forma de se melhorar a qualidade do protótipo final, diminuindo-se por exemplo o efeito de escada, reside na correcta orientação do modelo (Figura 2.12).

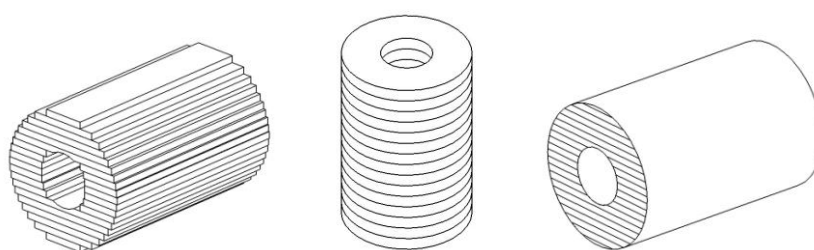


Figura 2.12: Diferentes resultados obtidos dependentes da orientação de construção e operações de pós-processamento.

A orientação dos modelos condiciona de forma significativa o tempo de construção do protótipo e consequentemente os custos de fabricação. Quando o objecto possui superfícies livres ou volumes retidos, a orientação depende do efeito escada e do material em excesso

que é necessário retirar através de processos de polimento a quando de operações de acabamento.

2.3 - Processos de Protótipagem Rápida

2.3.1 - Processos Estereolitográficos

Os processos estereolitográficos compreendem (Bártolo, 2010; Gibson *et al*, 2009; Bártolo e Gaspar, 2008; Bártolo, 2007; Bártolo e Mateus, 2002):

- Irradiação directa;
- Irradiação por máscara.

Os processos de irradiação directa vulgarmente designados por estereolitografia envolvem a construção de modelos físicos através de um processo de solidificação ponto por ponto de resinas líquidas. Este processo, desenvolvido por Hull (1986), foi comercialmente apresentado em 1989 pela empresa 3D Systems (Estados Unidos) e envolve a utilização de radiação ultravioleta para localmente solidificar uma resina líquida foto-sensível. Processos envolvendo radiação infravermelha e combinação de radiação ultravioleta e infravermelha foram igualmente propostos (Bártolo, 2010). Um sistema de estereolitografia (Figura 2.13) consiste num computador que serve de unidade de controlo, numa tina contendo uma resina foto-sensível, numa mesa elevadora (plataforma de trabalho), num laser, num sistema de espelhos dinâmicos para dirigir o laser até à superfície da resina e num nivelador que reduz as tensões superficiais do modelo e estabiliza a superfície da resina líquida, minimizando o tempo de processamento de cada camada (Jardini *et al*, 2004; Bártolo *et al*, 2004; Bártolo e Mitchell, 2003; Bártolo, 2001).

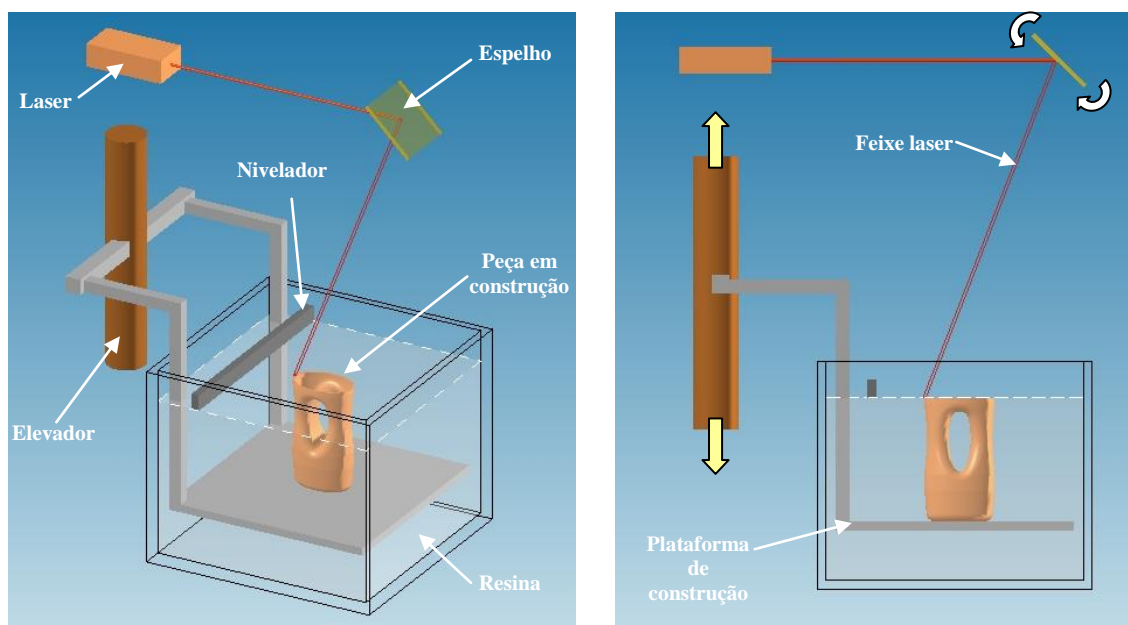


Figura 2.13: Estereolitografia.

Com base nas especificações contidas no ficheiro formato **SLI** a máquina de estereolitografia “*imprime*” o modelo através da construção das diversas camadas que o constituem (a espessura de cada camada varia entre 0.25 e 0.5mm). A unidade de controlo afina os espelhos para focar o raio de luz de modo a solidificar uma secção transversal com determinada espessura na superfície do líquido. Em seguida a mesa elevadora baixa um valor igual à espessura da camada seguinte repetindo-se o processo.

Durante o processo de construção e para além da definição do modelo físico é, em geral, necessário a definição de suportes estruturais uma vez que o fabrico do modelo é efectuado no meio líquido. Estes, para além de suportarem convenientemente as camadas que se encontram em suspensão são também utilizados para fixar o modelo ao elevador, evitando a sua construção directa sobre a plataforma de trabalho, possibilitando a sua remoção sem danificação e permitem compensar desalinhamentos angulares existentes entre a plataforma de trabalho e a superfície da resina (Bártolo, 2001).

A profundidade de polimerização é controlada pela intensidade do laser, enquanto que, a espessura das secções transversais do modelo é controlada pelo laser e pelos incrementos de movimento vertical da plataforma elevatória (Bártolo, 2010; Gibson *et al*, 2009).

Uma vez construído, o modelo é retirado, os suportes estruturais removidos e os excessos de polímero eliminados, utilizando-se para tal um material absorvente ou limpeza ultrasónica. Como, em geral, continua a existir polímero não curado entre as superfícies das secções transversais, a peça deverá sofrer uma cura final numa câmara de pós-cura - operação de pós-cura - onde é exposto a uma intensa radiação ultravioleta. O protótipo completamente solidificado poderá então sofrer processos de acabamento e pintura se pretendido. A duração da cura e pós-cura varia de acordo com a complexidade geométrica e dimensões da peça bem como com o tipo de polímero utilizado.

As diferentes etapas de fabricação de protótipos por estereolitografia e a sua utilização como pré-formas para a produção de ferramentas são ilustradas na Figura 2.14.

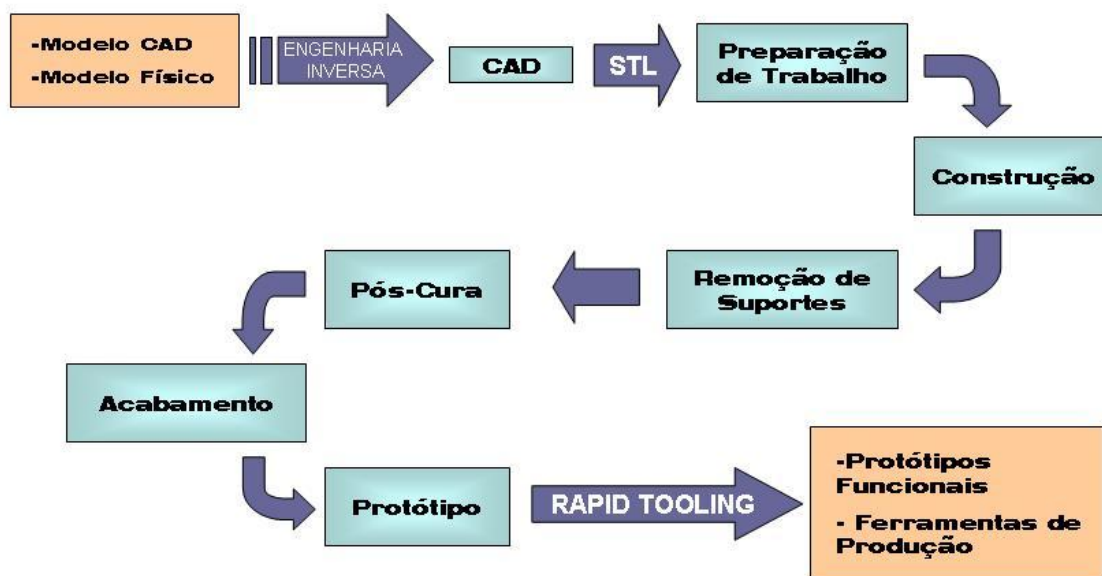


Figura 2.14: Produção de protótipos por estereolitografia e sua utilização para a produção de ferramentas de produção e protótipos funcionais através de técnicas de fabrico rápido (rapid tooling).

Os protótipos obtidos por estereolitografia apresentam um aspecto de plástico translúcido, com uma elevada precisão, rigor dimensional e um elevado grau de detalhe e pormenor.

As principais vantagens e desvantagens do processo de estereolitografia são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Principais vantagens e desvantagens do processo de Estereolitografia.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Obtenção de formas complexas e detalhes rigorosos • Boa precisão dimensional • Bom acabamento superficial • Obtenção de modelos parcialmente ocos, o que reduz o custo de produção • Processo largamente implantado e utilizado 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo dos modelos • Necessidade de suportes estruturais e de pós-processamento para os retirar • Necessidade de operações de pós-cura • Contracção e empenos • Elevado custo das matérias-primas e dos equipamentos • Utilização de materiais tóxicos • Utilização de laser • Gama reduzida de resinas

Os processos de irradiação por máscara consistem na utilização de uma máscara (imagem negativa da secção transversal desejada) produzida por técnicas xerográficas, interposta entre uma lâmpada de ultravioletas e a camada de resina que se pretende polimerizar (Bártolo, 2010; Bártolo, 2007). Deste modo, consegue-se polimerizar cada camada com uma única exposição luminosa. No entanto, estes processos são menos eficientes do ponto de vista energético que os processos de irradiação directa.

2.3.2 - Processos de Laminagem

O processo de protótipagem rápida por laminagem foi desenvolvido em 1985 por Michael Feygin que o patenteou sob a designação de Laminated Object Manufacturing (LOM) (Feygin *et al*, 1997). Em 1989, é criada a empresa Helisys que comercializa no início dos anos 90 as primeiras máquinas LOM. Em 2000, a empresa muda de nome passando a designar-se por Cubic Technologies. Actualmente, existem várias outras empresas que desenvolvem e comercializam sistemas de laminagem.

No processo LOM, os modelos são construídos por colagem e corte sucessivo de folhas de papel pré-impregnadas na sua superfície inferior com um adesivo termoplástico (Figura 2.15 a). A alimentação da zona de construção é efectuada de forma continua a partir de um rolo de material colocado num dos lados da máquina (Gibson *et al*, 2009). Após a fase de alimentação um rolo pré-aquecido, a cerca de 300°C, comprime cada nova camada sobre a anterior promovendo a sua adesão (Bártolo, 2001). Em seguida, um feixe de radiação infravermelha produzido por um laser de CO₂ de média potência (25-50w) é utilizado para cortar o perímetro exterior correspondente à secção transversal do modelo. A área do material que rodeia o contorno do modelo é igualmente cortada em quadrados servindo de suporte às camadas seguintes (Figura 2.15 b) numa operação que, em alguns casos, pode corresponder a 40 ou 50% do tempo total de corte (Chiu *et al*, 2003; Wah e Jonejafs, 2003). No final, obtém-se um paralelepípedo de papel, sendo o modelo “revelado” após uma operação de descubicagem (Figura 2.16).

Após separação do modelo, este deve ser imediatamente impermeabilizado com poliuretanos, resinas epoxídicas ou sprays de silicone, verniz, tapa poros ou tinta, para prevenir a absorção de humidade por parte do material, aumentando-se assim, a resistência mecânica e a estabilidade dimensional dos modelos.

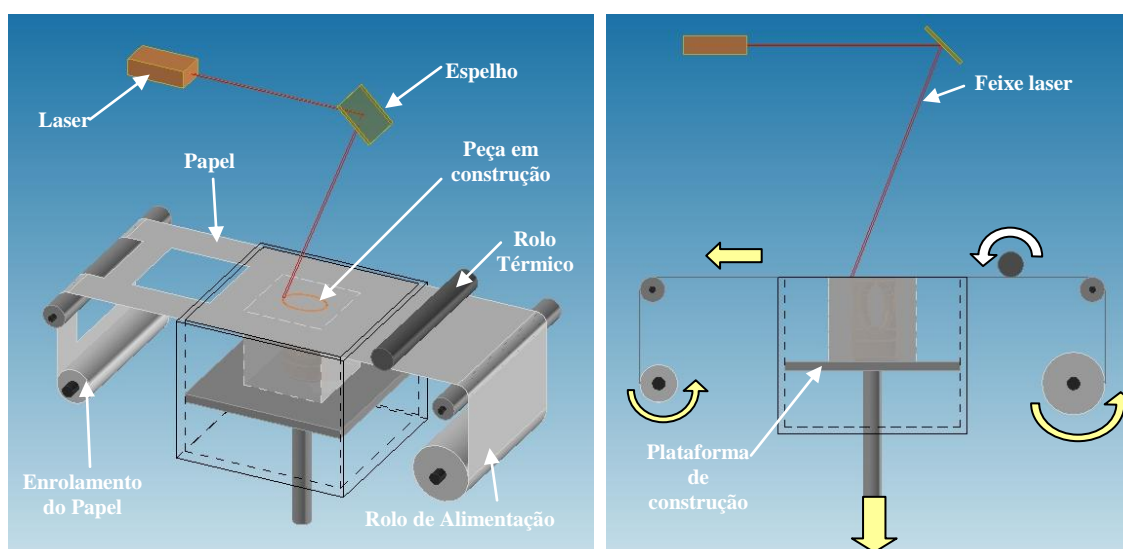


Figura 2.15: a) Esquema de uma máquina de LOM; b) Esquema do processo LOM.

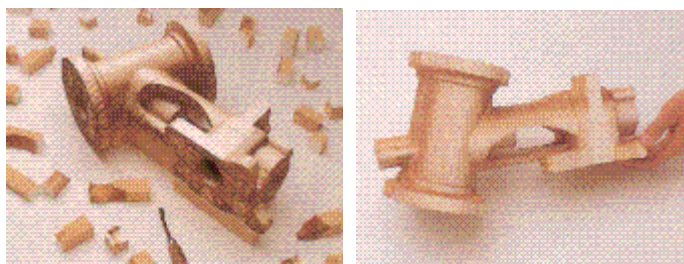


Figura 2.16: Remoção do material envolvente, desvendando a peça fabricada

O processo LOM permite a utilização de uma grande variedade de materiais orgânicos e inorgânicos, o que possibilita uma gama alargada de opções em termos de preço, aspectos ambientais, propriedades químicas e mecânicas, durabilidade, etc. Os materiais utilizados são (Kumar e Kruth, 2010; Gibson *et al*, 2009; Klosterman *et al*, 1998):

- Papel;
- Plástico;
- Cerâmicos;
- Metais;
- Compósitos.

O material mais utilizado é o papel revestido com um polímero termo-sensitivo.

As principais vantagens e desvantagens do processo LOM são apresentadas na Tabela 2.2.

2.3.3 - Sinterização selectiva por laser

A sinterização selectiva por laser (SLS, Selective Laser Sintering) é um processo de protótipagem rápida, desenvolvido por Deckard (Deckard, 1986). Este processo (Figura 1.17) utiliza um laser emitindo um feixe de radiação, na gama do infravermelho, para selectivamente aquecer e fundir material em pó (Kumar e Kruth, 2010; Mumtaz e Hopkinson, 2010, Shi *et al*, 2004).

Tabela 2.2: Principais vantagens e desvantagens do processo de laminagem

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de produção de componentes de grandes dimensões • Baixo custo do material usado • Ausência de deformações associadas a fenómenos de mudança de fase, típicos de outros processos • Não são necessários suportes 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de remover impurezas formadas pelo corte laser na secção transversal • Possível deformação da laminação como resultado de intensas tensões de origem térmica induzidas pelo calor do laser • Fraco acabamento superficial • Baixa resistência mecânica na direcção vertical • Os modelos absorvem humidade, a não ser que a superfície seja tratada • Necessidade de operações de descubicagem • Maquinabilidade limitada devido a possível delaminação • Grande quantidade de material desperdiçado • Impossibilidade de construção de objectos ocos

Dependendo do material e das suas características de absorção espectral, na gama do infravermelho, uma certa quantidade de energia fornecida pelo laser é transformada em calor (Kruth *et al*, 2003). De notar que, a eficiência da interacção pó-laser diminui quando as partículas de pó possuem dimensões superiores ao comprimento de onda do feixe laser utilizado. Esta energia promove a fusão das partículas de pó vizinhas, assim como, a

adesão de cada nova camada à camada sinterizada anteriormente. O material em pó deve ser pré-aquecido a uma temperatura ligeiramente abaixo do seu ponto de fusão. Deste modo, o processo de sinterização é realizado numa câmara aquecida, com ambiente controlado, na presença de um gás inerte (habitualmente nitrogénio), para evitar riscos de contaminação por acção do oxigénio e também o risco de combustão/explosão. A concentração de oxigénio é mantida abaixo dos 2%.

O processo SLS, esquematicamente ilustrado na Figura 2.17 compreende três fases principais (Chua *et al*, 2003; Kruth *et al*, 2003; Tolochko *et al*, 2003; Bártolo, 2001):

- Uma camada de material em pó é depositada na zona de construção do sistema SLS por intermédio de um rolo de nivelamento;
- O feixe laser varre cada camada de acordo com a informação contida no ficheiro *sl* (ver secção 2.2), sinterizando selectivamente o material. O pó não irradiado serve de suporte à camada seguinte, evitando igualmente possíveis escorregamentos do protótipo;
- Após a sinterização de uma camada a plataforma elevatória, sobre a qual o modelo é construído, desce uma distância igual à espessura da camada seguinte e o processo repete-se até à obtenção final do modelo.

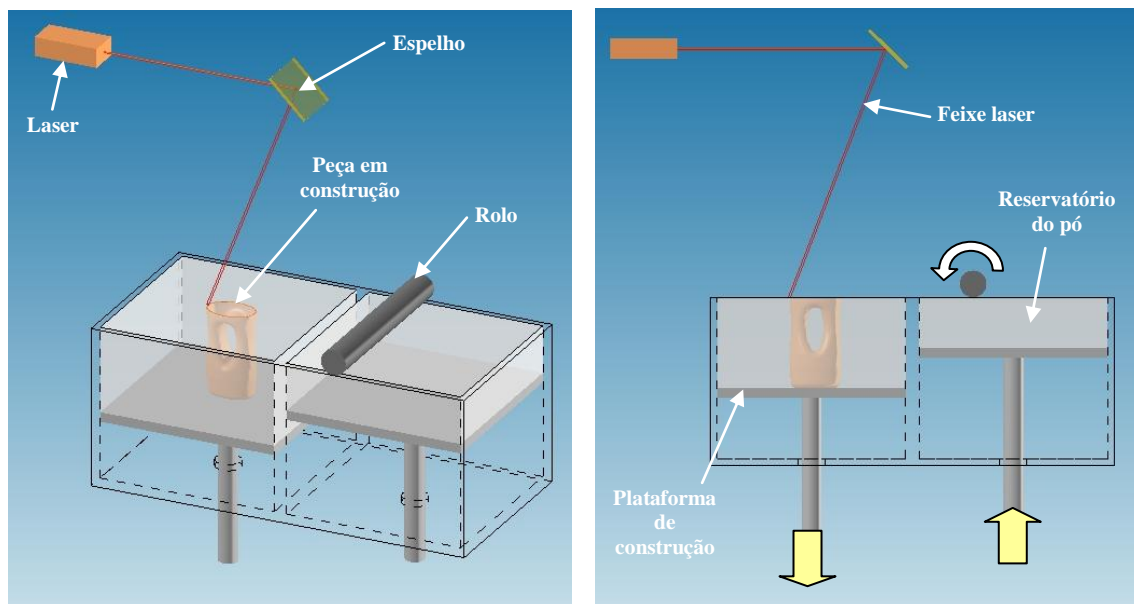


Figura 2.17: Processo de sintetização selectiva por laser.

Após a obtenção do protótipo, este é sujeito a uma operação de limpeza no qual lhe é removido o pó envolvente seguindo-se operações posteriores de acabamento (Figura 2.18).

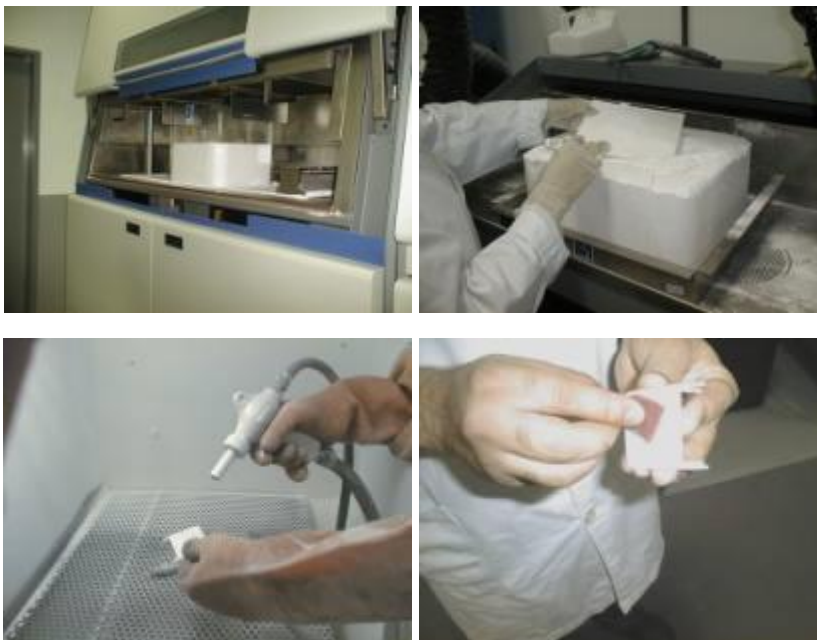


Figura 2.18: Remoção e limpeza dos protótipos.

Os parâmetros mais importantes para a fabricação de objectos através da sinterização a laser são: a potência do laser, a velocidade de deslocamento do feixe e o espaçamento entre as passagens do feixe do laser (Volpato, 2001). A velocidade de varrimento determina a energia posta em jogo no processo de sinterização. Deste modo, a redução da velocidade de varrimento caracteriza-se por um aumento da energia fornecida ao material. Em alguns casos e dependendo do material a processar uma redução significativa da velocidade de varrimento pode originar empenos das peças obtidas. O espaçamento entre cada passagem do feixe laser influencia igualmente as propriedades mecânicas e a qualidade das peças obtidas. A correcta sobreposição das passagens auxilia a sinterização do material proporcionando uma união mais homogénea. A influência destes parâmetros é ilustrada na Figura 2.19.

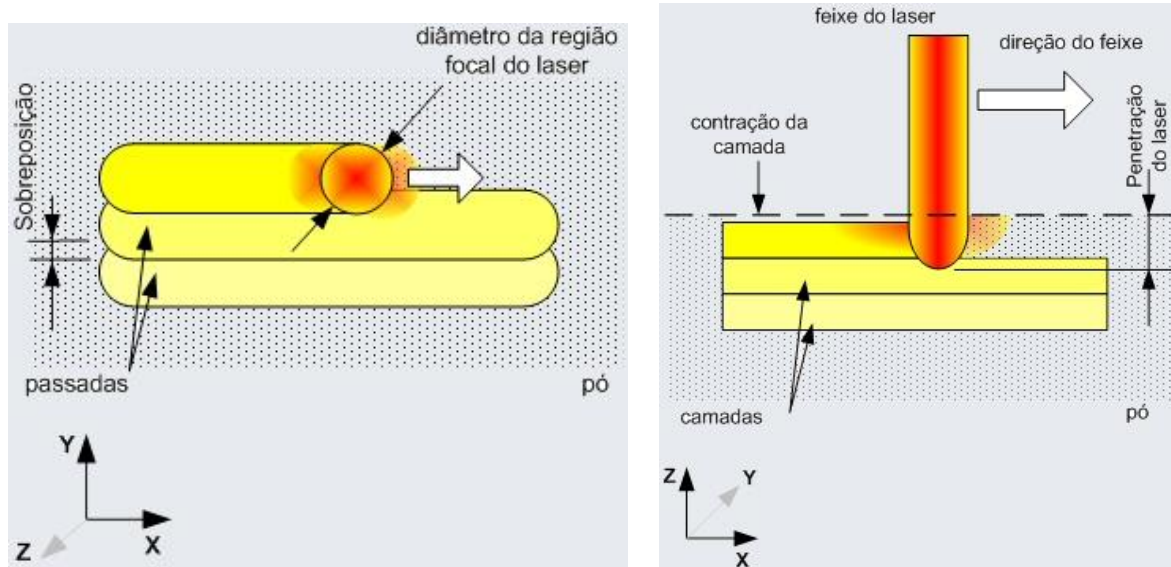


Figura 2.19: Influência dos principais parâmetros de construção no processo SLS.

Em termos dos materiais a processar os principais processos comerciais de sinterização dizem respeito a (Kumar e Kruth, 2010; Goodridge *et al*, 2010; Gibson *et al*, 2009; Kruth *et al*, 2007):

- Sinterização de materiais poliméricos, quer amorfos como o policarbonato quer semi-cristalinos como o nylon;
- Sinterização de materiais metálicos nomeadamente pó de níquel, bronze ou cobre sem qualquer ligante polimérico, ou pó metálico revestido com material polimérico;
- Sinterização de materiais cerâmicos.

As principais vantagens e desvantagens do processo SLS são apresentadas na Tabela 2.3.

2.3.4 - Processos de impressão

O processo de impressão tridimensional compreende duas estratégias de construção (Barton *et al*, 2010; Crizewski *et al*, 2009; Lewis, 2002; Bártolo, 2001; Carrión, 1997):

- Construção por deposição selectiva de ligante;

- Construção por deposição selectiva de um jacto de partículas;

Tabela 2.3: Principais vantagens e desvantagens do processo SLS

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Não são necessários suportes estruturais • Gama alargada de materiais • Possibilidade de empilhar várias peças para fabricação • Não há desperdício de material • Obtenção de peças de elevada resistência mecânica e térmica, próximo dos materiais equivalentes injectados 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos com alguma porosidade • Fraco acabamento superficial • Peças com superfícies porosas • Possibilidade de emissão de gases tóxicos resultantes do processo de sinterização • Custo elevado do equipamento • Custo elevado das matérias-primas • Distorções e empenos • Elevado tempo de aquecimento e arrefecimento da zona de trabalho

A primeira estratégia de fabricação é actualmente comercializada pela empresa ZCorp (Estados Unidos) e foi desenvolvida no MIT (Massachusetts Institute of Technology) por Sachs (Sachs *et al*, 1993). Este processo (Figura 2.20) utiliza um jacto de material aglutinante sobre camadas de pós poliméricos, metálicos ou cerâmicos para produzir os protótipos. Durante o processo de construção, o material não agregado desempenha um papel importante como suporte (Carrión, 1997). Um rolo é utilizado para depositar novas camadas de material e compactar uma camada sobre a outra ao mesmo tempo que nivela. Uma vez obtida, a peça dita “verde” sofre um processo de sinterização para remoção do ligante.

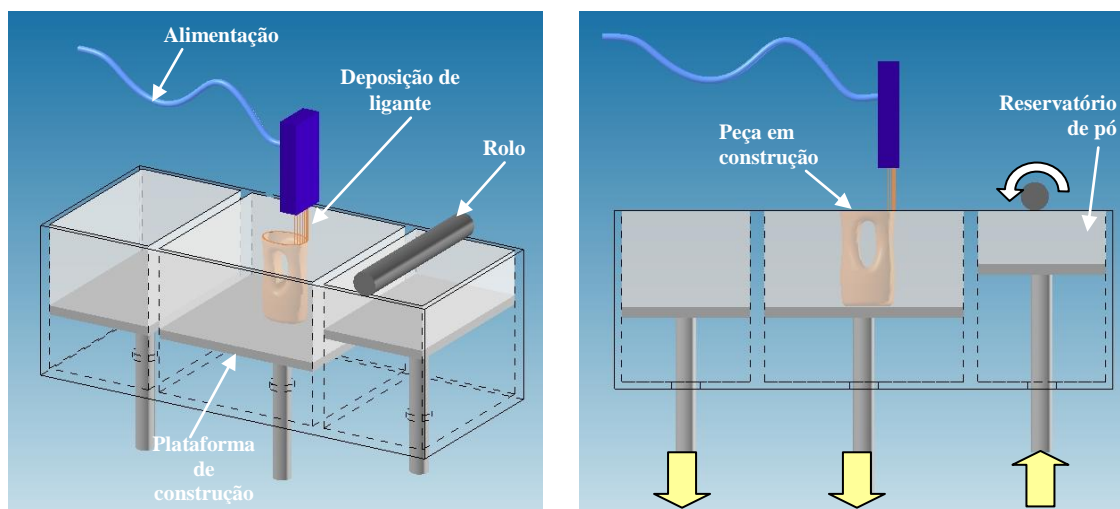


Figura 2.20: Princípio de construção de modelos através do processo de impressão 3D.

A segunda estratégia de fabricação é actualmente comercializada pela empresa 3DSystems, através do sistema Thermojet, utilizando tecnologia das impressoras a jacto de tinta. Neste processo (Figura 2.21) vários jactos de ceras poliméricas previamente fundidas são utilizados para a produção muito rápida de protótipos conceptuais. O processo requer suportes estruturais produzidos, utilizando-se o mesmo material do protótipo, e os protótipos são bastante frágeis.

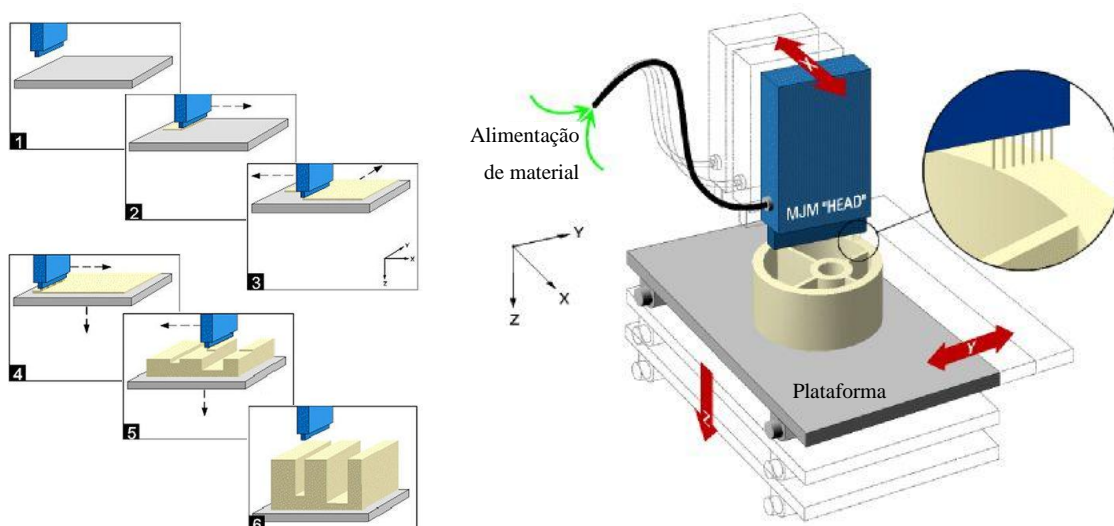


Figura 2.21: Funcionamento de um sistema do tipo Thermojet.

As principais vantagens e desvantagens do processo Impressão Tridimensional são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Principais vantagens e desvantagens do processo de Impressão 3D.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Não utiliza lasers• Elevada velocidade de fabrico• Materiais baratos e não tóxicos• Baixo custo do equipamento	<ul style="list-style-type: none">• Baixa precisão dimensional• Baixo acabamento superficial• Baixa resistência mecânica dos modelos• Necessita pós-processamento para limpeza e infiltração com resina de modo a melhorar a resistência mecânica• Limitações na funcionalidade das peças obtidas

2.3.5 - Processos de Extrusão

O processo de protótipagem rápida por extrusão (Figura 2.22) foi desenvolvido por Scott Crump (1989) sob designação Fused Deposition Modelling (FDM). Este processo baseia-se na extrusão de um material termoplástico através de uma fieira (Kumar e Kruth, 2010; Gibson *et al*, 2009; Yan *et al*, 2009; Ahn *et al*, 2004). O material, sob a forma de fio, é alimentado através de uma bobine. Uma cabeça de extrusão magnética varre a área requerida para depositar o material de modo homogéneo em cada camada, o qual, vai solidificando durante o arrefecimento. Quando a camada se encontra completamente preenchida, a plataforma que suporta a peça em construção é ajustada em altura e o ciclo de extrusão para deposição de uma nova camada é reiniciado. A existência de uma bolsa de ar entre a cabeça extrusora e a plataforma de construção impede o contacto entre ambas, reduzindo o atrito e permitindo elevadas velocidades de execução. Uma segunda cabeça é,

igualmente, usada para extrudir material de suporte, em regra, uma cera ou polímero solúvel em água.

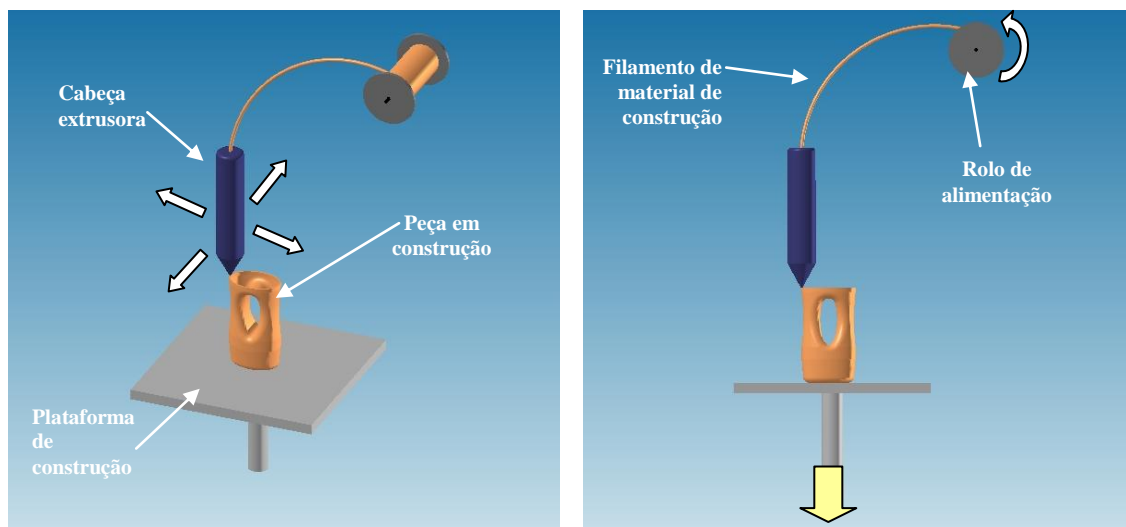


Figura 2.22: Sistema FDM.

A tecnologia FDM utiliza duas estratégias de construção (varrimento): *raster*, *contour* e combinação *raster/contour* (Figura 2.23). No processo de fabricação, a primeira camada é geralmente definida reproduzindo-se em primeiro lugar o contorno ou perímetro da secção transversal e, em seguida, a área interna. Para aumentar a resistência da peça, a direcção do preenchimento *raster* é alternada de 90° a cada nova camada (Figura 2.23d) (Ahrens *et al*, 2007).

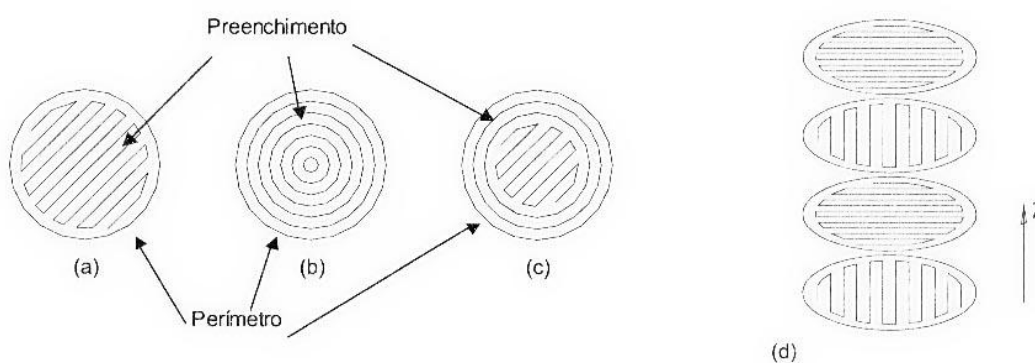


Figura 2.23: Estratégias de preenchimento das camadas do processo FDM: (a) preenchimento tipo raster; (b) preenchimento tipo contour; (c) preenchimento raster e contour e (d) alternância da direcção do preenchimento raster.

O processo permite a substituição de bicos calibrados, fornecendo diâmetros de filamento distintos. Alguns dos principais parâmetros possíveis de serem controlados no processo são:

- A espessura de camada;
- Espessura do filamento no preenchimento e contorno;
- Intervalo (gap) entre filamentos depositados.

Os materiais extrudidos podem ser ceras, ABS e poliamidas, permitindo, por consequência, a obtenção de alguns protótipos funcionais (Gibson *et al*, 2009; Chua *et al*, 2003).

As principais vantagens e desvantagens do processo são apresentadas na Tabela 2.5.

Recentemente, foi proposto um novo sistema baseado no processo FDM destinado à produção de peças cerâmicas. Este processo, designado por FDC (Fused Deposition of Ceramics) é usado para fabricar componentes funcionais numa variedade de materiais cerâmicos. O processo FDC compreende as seguintes etapas:

- Preparação de feedstocks;
- Extrusão;
- Eliminação de ligante e infiltração.

O desenvolvimento de um sistema FDC e correspondente formulação de feedstock constitui o tema central desta dissertação.

Tabela 2.5: Principais vantagens e desvantagens do processo FDM.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Equipamento barato• Não utiliza laser• Não utiliza materiais tóxicos• Grande precisão dimensional• O equipamento pode ser facilmente montado e usado em ambiente de escritório• Bom processo para obtenção de peças funcionais• Possibilidade de mudança de materiais	<ul style="list-style-type: none">• Processo lento• Fraco acabamento superficial• Necessita de suportes estruturais• Os modelos têm pouca resistência na direcção vertical• Flutuações da temperatura durante o processo podem levar a fenómenos de delaminação

2.4 - Conclusões

Após a análise dos vários processos de protótipagem rápida existentes actualmente, podemos concluir que, grande parte dos processos tem como desvantagens o custo da matéria-prima, a área de trabalho reduzido e tempos e velocidades de processamento baixos.

De entre os processos de protótipagem rápida, os processos de extrusão assumem particular destaque, não só, por serem verdadeiros sistemas *desktop* mas também, por permitirem a obtenção de protótipos funcionais de boas propriedades mecânicas. Contudo, os sistemas de protótipagem por extrusão estão limitados à utilização de termoplásticos cujo processamento é pouco atractivo do ponto de vista energético, à obtenção de componentes de pequena/média dimensão e à utilização de material sob a forma de fio. Deste modo, constitui objectivo central desta dissertação o desenvolvimento de um sistema de extrusão de pastas cerâmicas (ver Capítulo 4) assim como caracterizar e preparar misturas de baixo custo adequadas ao processo FDC (ver Capítulo 3).

CAPITULO 3:

MATERIAIS E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

3.1 - Introdução

O sucesso do processo de extrusão de misturas cerâmicas depende de forma significativa dos materiais seleccionados, da preparação da mistura e da adequação das condições de processamento. De modo a serem minimizados os custos energéticos associados ao processo de fabrico e as contracções associadas ao processo de arrefecimento da mistura extrudida, importa, por exemplo, utilizarem-se misturas contendo um ligante polimérico de baixo ponto de fusão. Adicionalmente, é fundamental a obtenção de misturas de elevada homogeneidade que permitam a extrusão de filamentos igualmente homogéneos (ver Capítulo 4) e a obtenção de peças de boa qualidade. Por questões relacionadas com o processamento é ainda importante garantir a obtenção de misturas que apresentem boas características reológicas.

Neste capítulo é apresentado o processo de preparação das misturas, descrevendo-se e caracterizando-se pormenorizadamente os seus constituintes em termos de composição química, densidades, tamanho e distribuição de tamanho das partículas, morfologia das partículas, análise térmica, entre outros. A optimização do teor de pós na mistura é igualmente descrita. As diferentes técnicas de caracterização são introduzidas e apresentadas de forma detalhada.

3.2 - Misturas cerâmicas para extrusão

As misturas cerâmicas para prototipagem por extrusão consistem num material cerâmico, ao qual é adicionado um ligante polimérico. Neste trabalho de investigação utilizou-se como material cerâmico partículas de alumina e uma mistura de ceras poliolefínicas como ligante.

A alumina foi seleccionada devido ao seu baixo custo e às boas propriedades mecânicas e eléctricas. O ligante, mistura composta essencialmente por ceras poliolefínicas é compatível com vários materiais e apresenta ciclos de eliminação mistos, isto é, dissolução por solvente seguida de eliminação térmica.

3.2.1 - Material cerâmico

A alumina é um cerâmico de elevada resistência mecânica, suportando solicitações mecânicas de intensidade elevada, estáticas e dinâmicas. Trata-se do óxido cerâmico mais utilizado em aplicações como tomadas eléctricas, fichas, torneiras, telhas resistentes à abrasão, ferramentas de corte, tijolo refractário e em medicina. As principais características deste material são:

- Elevada resistência à compressão;
- Elevada dureza;
- Resistência à abrasão;
- Elevada resistência química;
- Boas características dieléctricas.

A principal fonte de alumina é a bauxite, $\text{Al}_2\text{O}(\text{OH})_4$, que é transformada em alumina através do método de Bayer (Reed, 1995).

3.2.1.1 - Caracterização dos pós de alumina

Neste trabalho foram usados dois tipos de aluminas com diferentes tamanhos de partículas fornecidas pela empresa ALCOA. A composição química das duas aluminas consideradas, designadas por CT 1200 SG e CT 3000 SG é indicada na Tabela 3.1 (ALCOA). De acordo com o fornecedor ambos os pós apresentam um grau de pureza superior a 99.7% e área superficial específica de $3.7 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ (alumina 1200) e $7.5 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ (alumina 3000).

Tabela 3.1: Composição química das aluminas.

Constituintes	Composição (%massa)	
	CT 3000 SG	CT 1200 SG
Na₂O	0,08	0,06
Fe₂O₃	0,02	0,02
SiO₂	0,03	0,05
CaO	0,03	0,04
MgO	0,07	0,05
Al₂O₃	99,77	99,78

Com o objectivo de proceder a uma caracterização minuciosa dos pós de alumina utilizados neste trabalho de investigação foram ainda efectuadas as seguintes análises:

- Determinação da densidade batida e da densidade real;
- Avaliação do tamanho e distribuição de tamanho de partículas;
- Análise da morfologia das partículas;
- Análise estrutural;
- Análise térmica.

3.2.1.1.1 - Determinação da densidade batida e densidade real

A densidade é definida como a propriedade da matéria que corresponde à relação massa por volume, ou seja, à proporção existente entre a massa de um corpo e o seu volume.

A densidade batida é a densidade máxima que se pode obter por vibração de um pó sem a aplicação de pressão exterior. Deste modo, é determinada submetendo o pó contido num recipiente a uma vibração a fim de se obter o máximo empacotamento das partículas. A avaliação desta propriedade é importante em extrusão, dado que, neste processo os pós são agitados e empacotados, durante a fase de processamento.

Para a determinação da densidade batida dos pós de alumina utilizou-se um método manual. Numa proveta de $100 \pm 0,5 \text{ cm}^3$, adicionou-se pó até perfazer o seu volume total, registando-se a sua massa numa balança com precisão de $\pm 0,1 \text{ mg}$. Em seguida, a proveta foi batida, em movimentos constantes, contra uma base de apoio, cerca de 100 vezes, repetindo-se este procedimento até não haver variação do volume final. O valor da densidade batida foi calculado através do quociente da massa do pó pelo correspondente volume final. Este procedimento foi em seguida repetido, pelo menos três vezes, para uma correcta avaliação da densidade batida (Tabela 3.2).

A densidade real corresponde à relação existente entre as massas das partículas e o respectivo volume, fazendo a exclusão de todos os espaços vazios. Esta propriedade foi avaliada por picnometria de hélio, partindo do pressuposto que não há poros fechados entre as partículas, tendo-se utilizado um picnómetro de hélio Accupyc 1330 da *Micromeritics*. Este aparelho permite determinar a densidade da amostra, através da medição do seu volume por variação da pressão de hélio numa câmara de volume calibrado. O hélio é normalmente o gás utilizado por ser inerte e por penetrar facilmente nos poros da amostra, dado o tamanho reduzido dos seus átomos, permitindo determinar o volume do sólido com mais rigor. Assim, considera-se desprezável a contribuição de poros abertos no volume total na determinação da densidade real, embora esta seja inferior à densidade teórica no caso de existir porosidade fechada. Foram efectuadas três medições do volume da amostra, em cada análise, sendo a média desses valores o resultado final. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Densidade batida e densidade real dos pós de alumina.

Material	Densidade batida (g/cm^3)	Densidade real (g/cm^3)
Alumina CT 1200 SG	$1,60 \pm 0,01$	$3,92 \pm 0,01$
Alumina CT 3000 SG	$1,34 \pm 0,01$	$3,90 \pm 0,01$

A densidade batida é normalmente expressa como uma percentagem da densidade teórica. Neste caso, o valor da densidade teórica vai ser considerado igual ao determinado para a densidade real, pois os poros abertos foram ocupados por hélio, tendo-se partido igualmente do pressuposto de que não existe porosidade fechada. Deste modo, a densidade

batida para os pós em estudo é de 40.8 e de 34.4% da densidade teórica, respectivamente, para a alumina 1200 e 3000. Como se pode constatar, o pó de alumina 1200 apresenta uma maior razão entre a densidade batida e a teórica, permitindo desde logo concluir que o empacotamento das partículas para este pó é facilitado.

3.2.1.1.2 - Tamanho e distribuição de tamanho das partículas

Para a determinação da distribuição de tamanhos e mediana (d_{50}) das partículas de alumina recorreu-se à espectrometria de difracção laser, mais conhecida por LDS (*Laser Diffraction Spectrometry*), através da utilização do sistema Coulter LS 130 da *Coulter Electronics*. Neste aparelho, determina-se a distribuição granulométrica, a partir, da análise do padrão de difracção obtido, quando as partículas atravessam um feixe de luz laser, determinando teoricamente um diâmetro, baseado na área projectada, por aplicação do modelo óptico de Fraunhofer (Barth, 1984).

Após amostragem conveniente e o espatulamento dos pós da amostra com uma gota de dispersante foram preparadas suspensões, usando como meio suspensor a água, às quais se aplicou ultra sons, antes da análise, durante aproximadamente 5 minutos. A análise foi repetida três vezes.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 apresentam-se as distribuições granulométricas obtidas referentes à média dos vários ensaios efectuados com os pós de alumina. Estas encontram-se quantificadas em termos de d_{10} , d_{50} , d_{90} e da moda tal como se indica na Tabela 3.3.

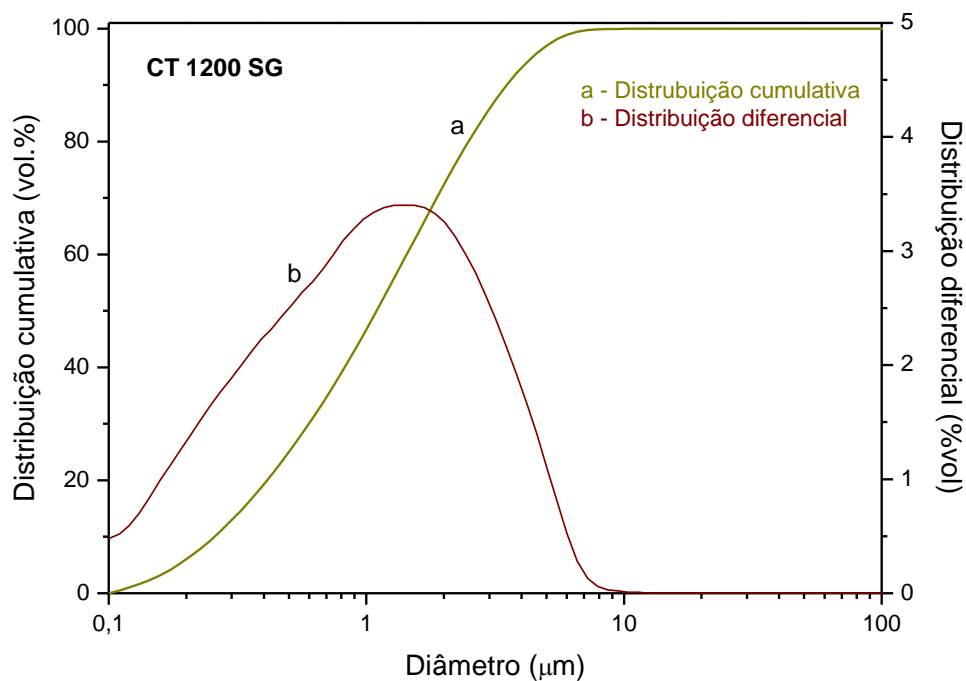


Figura 3.1: Distribuição granulométrica das partículas de alumina CT 1200 SG.

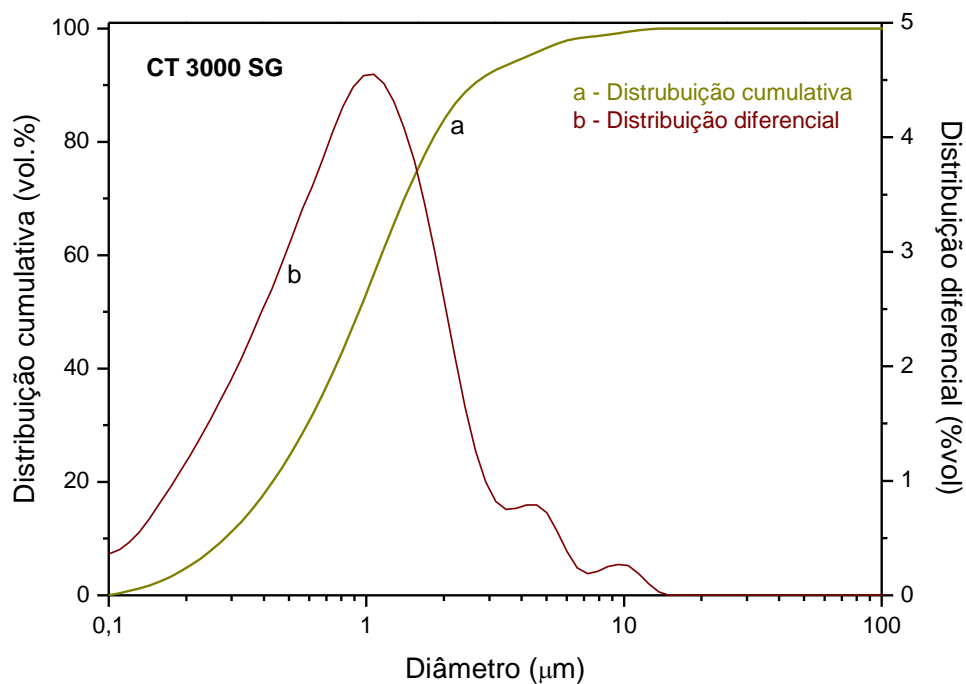


Figura 3.2: Distribuição granulométrica das partículas de alumina CT 3000 SG.

Tabela 3.3: Valores dos diâmetros percentuais d_{10} , d_{50} , d_{90} e da moda, obtidos das curvas granulométricas.

Material	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	Moda (μm)
Alumina CT 1200 SG	0,257	1,096	3,507	2,255
Alumina CT 3000 SG	0,281	0,936	2,592	2,653

Os resultados indicados nas Figuras 3.1 e 3.2 mostram que o material apresenta uma distribuição alargada dos tamanhos, estando esta compreendida entre 0,1 e 12,47 μm para a alumina 1200, e entre 0,1 e 16,38 μm para a alumina 3000. O diâmetro médio dos pós de alumina 1200 é de 1,096 μm enquanto que para a alumina 3000 o diâmetro médio dos pós é de 0,936 μm.

A largura da distribuição do tamanho das partículas, Sw [$Sw = 2,56/\log(d_{90}/d_{10})$] é de ≈ 2 para a alumina 1200SG e de ≈ 3 para a alumina 3000, o que significa que a alumina 1200 possui uma distribuição de tamanho das partículas mais larga comparativamente à alumina 3000, daí que o empacotamento das partículas seja mais favorável, tal como previsto pela relação existente entre a densidade batida e a densidade real.

3.2.1.1.3 - Análise morfológica das partículas

A forma das partículas cerâmicas é difícil de quantificar dado tratarem-se de partículas de pequenas dimensões e, como tal, com grande tendência para aglomerar. Neste estudo, a avaliação qualitativa da forma das partículas foi feita a partir de imagens adquiridas por microscopia electrónica de varrimento (*Scanning Electronic Microscopy- SEM*), tendo sido usado para tal um microscópio Leica. Para a análise, as amostras foram previamente dispersas em álcool e sujeitas a ultra sons, durante aproximadamente 3 minutos e amostrados para uma lamela de vidro, com o auxílio de uma pipeta. O facto deste tipo de pós apresentarem uma natureza não condutora, implicou o seu prévio revestimento com ouro. As micrografias obtidas para os pós de alumina 1200 e alumina 3000 são apresentadas nas Figuras 3.3 e 3.4. Os resultados da análise de morfologia dos pós de

alumina mostram que estes possuem, na generalidade, uma forma moderadamente irregular.

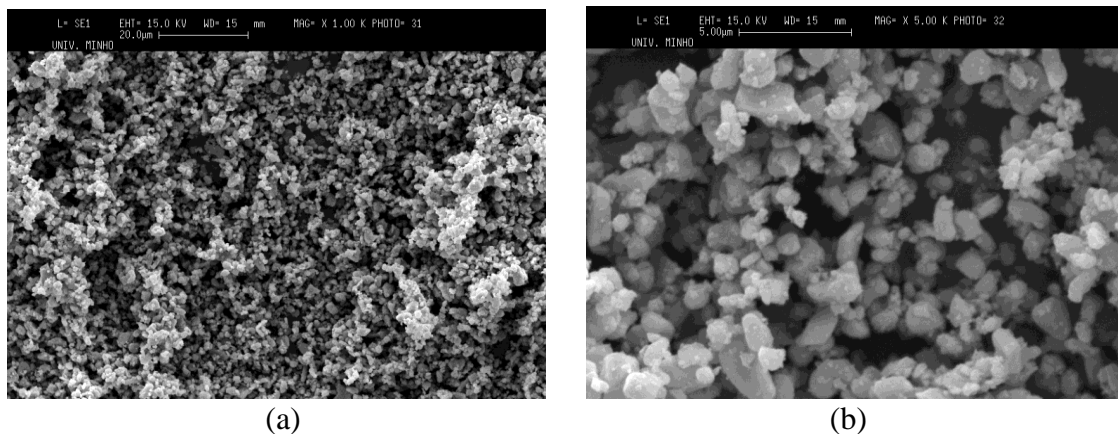


Figura 3.3: Morfologia das partículas de alumina 1200 SG: (a) Ampliação de 1000X; (b) Ampliação de 5000X.

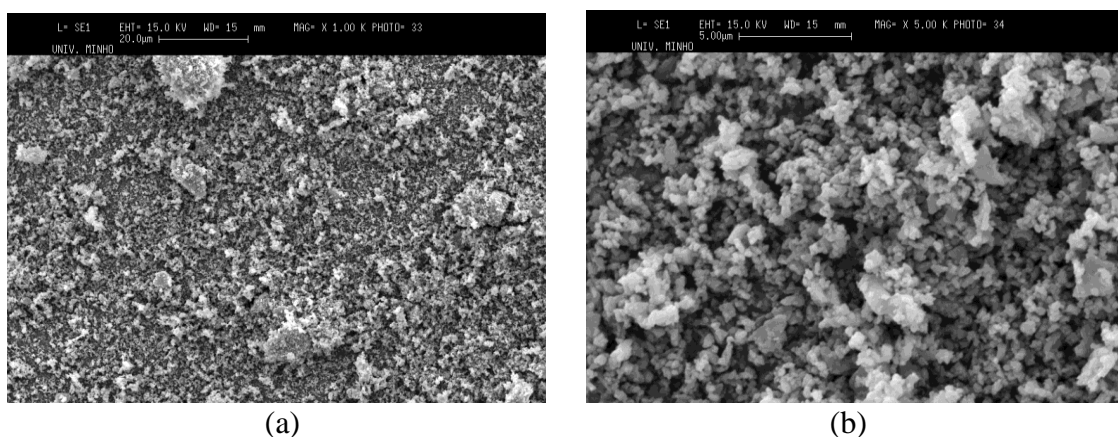


Figura 3.4: Morfologia das partículas de alumina 3000 SG: (a) Ampliação de 1000X; (b) Ampliação de 5000X.

3.2.1.1.4 - Análise estrutural dos pós de alumina

A análise da composição mineralógica dos pós de alumina foi efectuada com recurso a um sistema de difracção de raios X (DRX) constituído pelo difractómetro automático de marca *Philips*, modelo X'pert com goniómetro PW 3020/00, equipado com um detector unidireccional em arco de círculo de 120° com resolução de 0,01° e com geometria

Bragg-Bretano. O anticátodo usado foi de cobalto, com colimador e monocromador de grafite, sendo os comprimentos de onda utilizados $K_{\alpha 1}=0,178896$ nm e $K_{\alpha 2}=0,179285$ nm.

Na análise das amostras foi efectuado um varrimento contínuo num intervalo de difracção de 2θ compreendido entre 3 e 90° , com um passo de $0,025^\circ$ e tempo de aquisição de 0,5 s por passo. A indexação e identificação das fases presentes nos pós analisados foram efectuadas por comparação dos resultados obtidos com os apresentados nas fichas *ICDD* (*International Centre for Diffraction Data*). O procedimento adoptado foi descrito por Barreiros (2002), apresentando-se na Figura 3.5 o difractograma de raios X dos pós de alumina, sendo possível observar que a única fase mineralógica existente é o corindo (α - Al_2O_3).

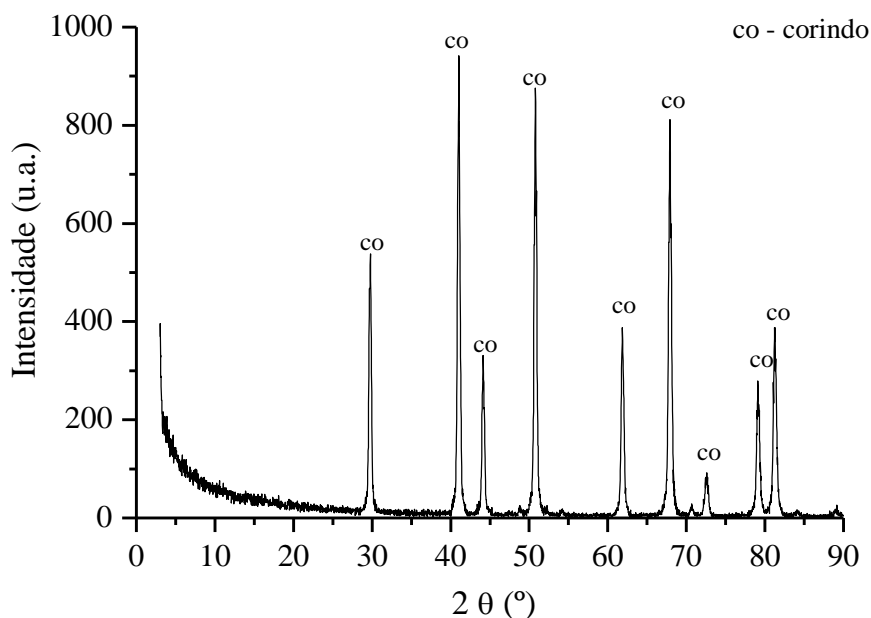


Figura 3.5: Difractograma de raios X dos pós de alumina (Barreiros, 2002).

3.2.1.1.5 - Análise térmica

Para análise das transformações de fase a que os pós cerâmicos estão sujeitos é necessário proceder-se a um estudo detalhado do seu comportamento térmico (temperaturas e velocidades de aquecimento). Esta análise permitirá a optimização das condições de processamento e a obtenção de estruturas de boa qualidade, dado que, os fenómenos de

mudança de fase, ocorridos durante o processamento, têm profundas implicações em termos das variações dimensionais, empenos, fissuração e níveis de porosidade.

A análise térmica foi efectuada por recurso à termogravimetria (TG) e à calorimetria diferencial de varrimento (*Differential Scanning Calorimetry-DSC*). Na primeira técnica são medidas as variações de massa da amostra em função da temperatura, através duma termo-balança, enquanto que, na segunda técnica, a amostra em conjunto com um material de referência são mantidos à mesma temperatura, através de um controlador de temperatura programável, sendo registada qualquer variação de fluxo entre a amostra e a referência em função da temperatura programada. Os ensaios foram efectuados num equipamento modelo Stanton Redcroft PL-STA 1500 da *Polymer Laboratories* (Figura 3.6), que permite a análise em simultâneo de DSC e TG para amostras com massa até 40 mg ou então, somente funcionando em modo TG, para amostras até 350 mg, com uma sensibilidade de 0,1 mg.



Figura 3.6: Equipamento TG/DSC Staton Redcroft PL-STA 1500.

Neste estudo, os ensaios de termogravimetria e de calorimetria diferencial de varrimento foram realizados simultaneamente, tendo-se registado perdas de massa (TG) e fluxos de calor (DSC) em função da temperatura. As gamas de temperaturas utilizadas nos ensaios foram entre 25°C e 700°C. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 3.7.

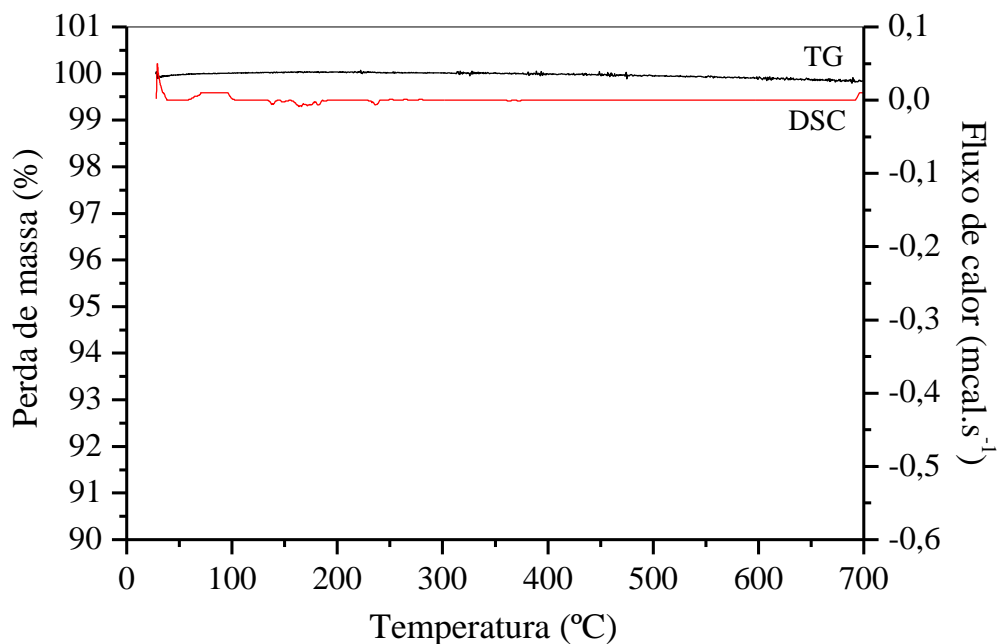


Figura 3.7: Análise termogravimétrica (TG) e de calorimetria diferencial de varrimento (DSC) dos pós de alumina (Barreiros, 2002).

Os resultados indicados na Figura 3.7 para a análise por calorimetria diferencial de varrimento, mostram não existirem picos endotérmicos ou exotérmicos. Estes resultados são confirmados pela curva de TG, através da qual, não se observa qualquer variação de massa para a gama de temperaturas considerada.

3.2.2 - Ligante polimérico

O ligante utilizado neste estudo foi uma mistura industrial denominada Licomont TP EK 583 produzida pela empresa *Clariant* (Figura 3.8). Trata-se de uma mistura composta essencialmente por ceras poliolefínicas, que é compatível com vários materiais, como por exemplo alumina, porcelana, aço inoxidável, nitreto de silício e carboneto de tungsténio. Os ciclos de eliminação adequados a este ligante poderão ser mistos, ou seja, dissolução por solvente seguida de eliminação térmica, uma vez que ele apresenta uma solubilidade de cerca de 50% em água, em acetona ou em etanol, devido à presença de polietilenoglicol (PEG) na sua constituição (Barreiros, 2002). De acordo com o fornecedor, este ligante apresenta um ponto de Vicat de $\approx 115^{\circ}\text{C}$, viscosidade de 6 Pas à temperatura de 150°C e densidade de 1100 kg/m^3 .



Figura 3.8: Ligante Licomont TP EK 583.

A temperatura de fusão do ligante, determinada por calorimetria diferencial de varrimento (DSC 131, Setaran) é de $\approx 75^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.9). A análise de calorimetria diferencial de varrimento indicado na Figura 3.9 foi obtida em condições de atmosfera não controlada e com uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}/\text{min}$. Para elevadas temperaturas ($> 325^{\circ}\text{C}$) é ainda possível observar uma transformação que poderá estar associada a fenómenos de degradação do ligante.

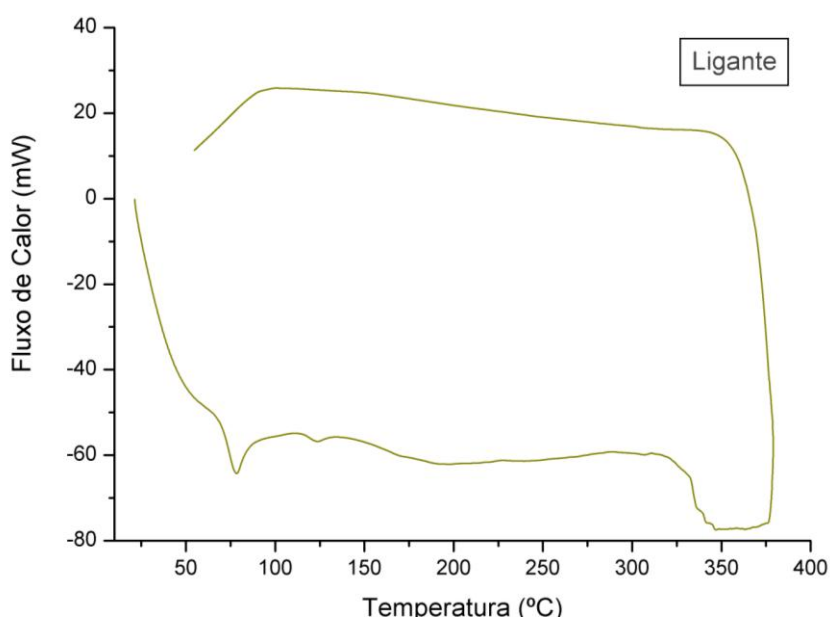


Figura 3.9: Calorimetria diferencial de varrimento do ligante.

3.3 - Preparação da mistura

As misturas a utilizar no processo de protótipagem rápida por extrusão devem apresentar as seguintes características:

- Homogeneidade;
- Boas características reológicas;
- Facilidade de eliminação de ligante.

Durante o processo de construção através da deposição de camadas, o filamento actua como um pistão na entrada da cabeça de extrusão, forçando o material amolecido para fora do bico. Se o filamento tiver uma baixa rigidez ou elevada viscosidade, ocorre o varejamento mesmo antes da entrada na zona de amolecimento, tornando o processo de extrusão inviável. O filamento requer assim uma elevada rigidez e uma baixa viscosidade (Masood e Song, 2005)

3.3.1 - Optimização do teor de pós na mistura

Para a correcta preparação da mistura pó/ligante é necessário a optimização da fracção volumica de sólidos (Φ), definida pela razão entre o volume de pó e o volume total de pó mais ligante, ou seja;

$$\Phi = \frac{(m_p/d_p)}{(m_p/d_p) + (m_l/d_l)}$$

em que m_p corresponde à massa do pó cerâmico, m_l à massa do ligante, d_p à densidade real do pó e d_l à densidade real do ligante (Barreiros, 2002). De acordo com a definição anterior, neste trabalho de investigação assume-se sempre o conceito de fracções volúmicas e não de fracções mássicas, pelo que sempre que for referido “percentagem de pós na mistura” tal corresponderá à percentagem em volume.

A percentagem de sólidos admissíveis numa mistura está relacionada com a maior ou menor facilidade de empacotamento das partículas. Deste modo, a relação existente entre a

densidade batida e a densidade real dos pós é a primeira indicação da percentagem de ligante a usar nas misturas pó cerâmico/ligante. A fracção de ligante deve corresponder à quantidade necessária para o preenchimento dos espaços vazios existentes entre as partículas de pó, sendo dependente de algumas características dos pós, nomeadamente da distribuição de tamanhos e da forma das partículas. No entanto, esta informação não é por si só, suficiente para determinar o teor de pós na mistura (Barreiros, 2002).

Durante o processo de mistura podem ocorrer três situações no que diz respeito à concentração de ligante:

- Quantidade excessiva de ligante: origina a separação do ligante e do pó, com consequentes problemas nas fases de processamento e de eliminação do ligante;
- Concentração crítica de ligante: todos os espaços existentes entre as partículas são preenchidos por ligante;
- Quantidade insuficiente de ligante: aumento drástico da viscosidade e formação de poros que provocam a fractura das peças durante a etapa de eliminação do ligante.

A optimização de pós na mistura passa assim, pela determinação da concentração crítica de pós, de modo a que, a mistura possua um valor de viscosidade que viabilize a sua extrusão e permita, simultaneamente, que a interacção entre as partículas de sólidos seja suficiente para assegurar a preservação da forma dos produtos durante o processamento. A composição da mistura foi determinada pela monitorização das variações do binário durante o processo de mistura entre os pós da alumina e do ligante usando o Reómetro de Binário (Misturadora Plastograph Brabender) indicado na Figura 3.10. A reometria de binário é baseada na resistência que o material oferece à rotação das pás (Barreiros e Vieira, 2000).



Figura 3.10: Reómetro de Binário (Misturadora Plastograph Brabender).

Após a estabilização da temperatura (140°C) a velocidade de rotação das pás foi seleccionada (60 rpm) e o sistema ligado. O ligante foi colocado na câmara de mistura e mexido até se atingir o seu completo amolecimento. Em seguida, a primeira fracção de pós de alumina correspondente a 52% (vol %) foi colocada na câmara de mistura, através de um alimentador, e pressionada usando um pistão e uma carga de 50N. Esta primeira adição de pó foi seguida por um aumento da temperatura até 160°C , sendo o material misturado durante 30 minutos para se alcançar uma boa dispersão dos pós no ligante, o que se traduz pela estabilização do binário. Várias adições do pó de alumina com a proporção desejada foram em seguida efectuadas, com uma composição diferindo apenas 1% na composição cerâmico/ligante em cada adição. Cada fracção de alumina foi pressionada manualmente

usando um pistão e misturada durante 10 minutos para a estabilização do binário. A última adição dos pós de alumina foi considerada quando a variação do binário sofreu uma inversão no seu comportamento, devido ao excesso de pó cerâmico na mistura. Foram realizados testes com ambos os pós de alumina, à temperatura de 160°C, com um teor de pós situado entre 52 e 67 % para a alumina 1200 e entre 52% a 63 % para a alumina 3000. De realçar que a temperatura de 160°C foi seleccionada tendo em atenção não só a temperatura de degradação do ligante (ver Figura 3.9) mas também a promoção de uma boa dispersão dos pós no ligante.

A variação do binário com o tempo de mistura é apresentado na Figura 3.11. Os resultados mostram um aumento gradual do binário com a adição de diferentes teores de pó, observando-se uma variação drástica quando a concentração da mistura alcança um valor crítico, correspondente ao ponto onde a viscosidade relativa se torna infinita (German e Bose, 1997). É ainda possível observar que após cada adição de pós o valor de binário atinge o estado estacionário em alguns minutos, para concentrações de sólidos abaixo do valor crítico, sendo extremamente irregular para valores mais altos, situação em que não estabiliza.

Nas Figuras 3.12 e 3.13 apresenta-se a variação do binário com a concentração de pós, no final de cada adição de pós, isto é, após se atingir o estado estacionário. Os resultados mostram que o comportamento da mistura para ambos os pós é bastante diferente, verificando-se que, na gama de binário considerado a alumina 3000 é mais difícil de dispersar que a alumina 1200. De acordo com os resultados das Figuras 3.12 e 3.13, constata-se ser possível dispersar 65% da alumina 1200 e 61% da alumina 3000. Deste modo, as misturas preparadas com a alumina 3000 apresentam uma maior concentração de ligante, uma vez que a instabilidade de binário ocorre para valores próximos de 59% de alumina. Para misturas preparadas com a alumina 1200, a instabilidade de binário ocorre somente para um teor de pós de 62%.

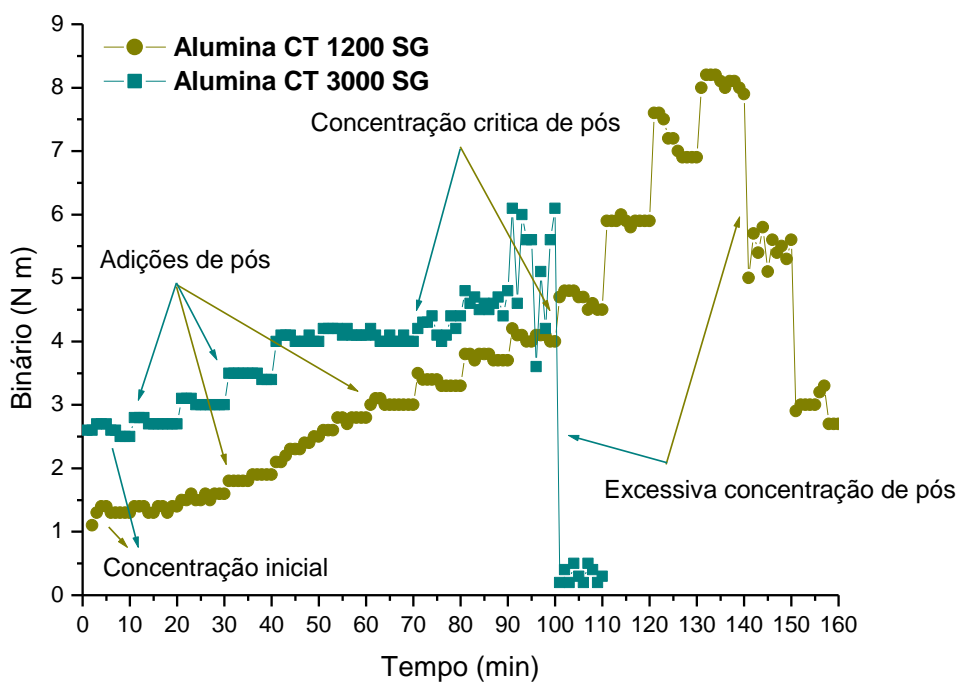


Figura 3.11: Binário em função do tempo de mistura para várias concentrações de pós da alumina CT 1200 SG e CT 3000 SG, a 60 rpm e 160°C.

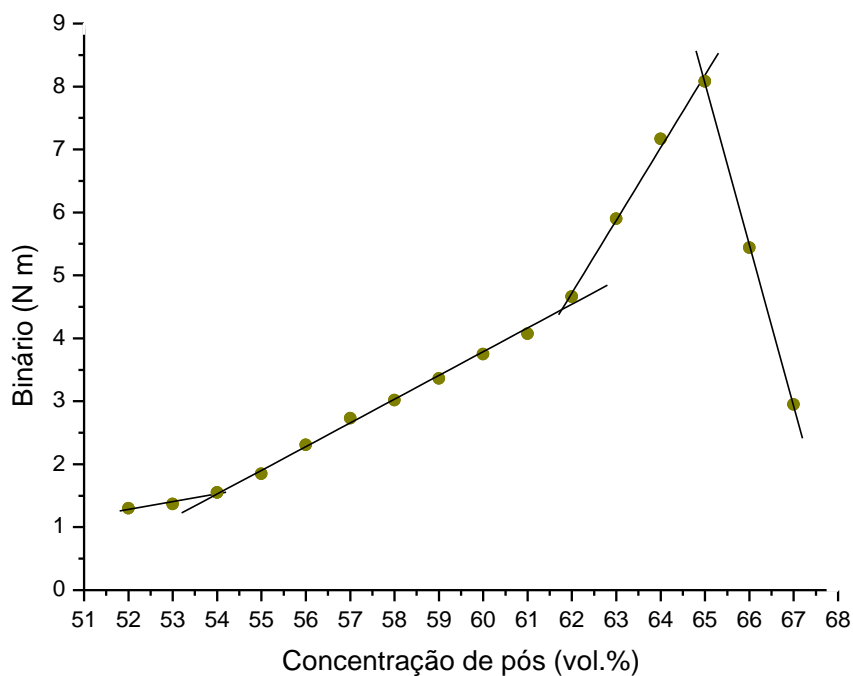


Figura 3.12: Binário em função da concentração de pós da alumina 1200.

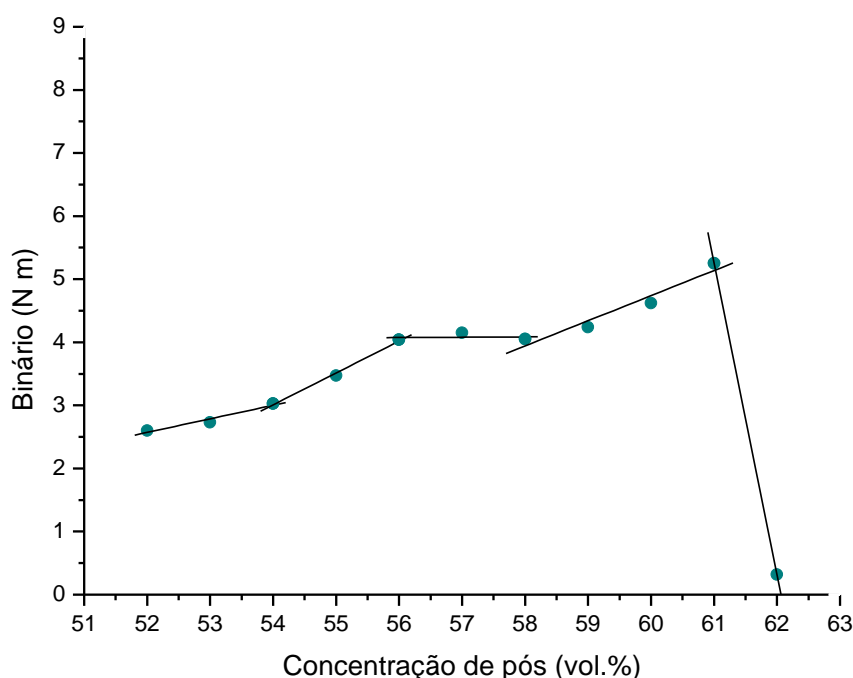


Figura 3.13: Binário em função da concentração de pós da alumina 3000.

Os resultados apresentados nas Figuras 3.12 e 3.13 mostram que a variação do binário com a concentração de pós apresenta também diferentes regimes para cada tipo de alumina considerado. A alumina 1200 apresenta quatro regimes principais de binário correspondentes a 52-54%, 54-62%, 62-65% e acima de 65% da concentração de pós (Figura 3.12). No intervalo compreendido entre 52 e 54%, o valor do binário aumenta ligeiramente com a concentração de pós, enquanto que para valores situados no intervalo 54 a 62% a variação do binário é mais acentuada. Para valores elevados de concentração de pós é possível observar um aumento significativo do binário de mistura, alcançando o valor máximo a 65%. A partir deste valor o binário diminui devido a uma excessiva concentração de sólidos. Como a viscosidade relativa se torna bastante elevada para concentrações de pós próximas do valor crítico, este valor deverá ser de 62% para a alumina 1200. Todavia, para prevenir problemas durante a fase de remoção de ligante no processo de prototipagem por extrusão foi decidido preparar três misturas com concentrações de pós situadas entre os dois pontos de perturbação de binário. As misturas preparadas foram: 1200-56%, 1200-58% e 1200-60%, em que o primeiro número indica o tipo de alumina e o segundo a concentração de alumina. De notar que o processo de prototipagem rápida por extrusão requer um compromisso entre a viscosidade da mistura e

a precisão dimensional dos objectos, que depende da concentração de pós na mistura. De facto, elevadas concentrações de pós aumentam a viscosidade da mistura a ser extrudida, o que requer valores de pressão elevados e elevadas temperaturas de processamento, reduzindo, no entanto, possíveis imprecisões durante as etapas de remoção de ligante e de sinterização dos pós.

No caso da alumina 3000, a variação do binário de mistura com a concentração de pós é traduzida por cinco regimes, correspondendo os quatro primeiros a teores de pós entre 52-54%, 54-56%, 56-58% e 58-61%, e o último para valores superiores a 61% da concentração de pós (Figura 3.13). Neste caso, decidiu-se preparar as seguintes misturas: 3000-54%, 3000-56% e 3000-58%. A mistura contendo 54% da concentração de pó contém uma baixa concentração de sólidos, o que pode induzir alguns problemas durante os tratamentos térmicos associados à remoção de ligante e à sinterização. Esta mistura foi apenas considerada devido aos problemas observados no processo de mistura da alumina 3000 com o ligante.

3.3.2 - Processo de mistura e granulação

No sentido de avaliar qual a concentração de alumina na mistura mais adequada para o processamento por extrusão, foram preparadas todas as misturas consideradas na etapa de optimização do teor de pós, designadamente: 1200-56%, 1200-58%, 1200-60%, 3000-54%, 3000-56% e 3000-58. As misturas foram preparadas numa misturadora Z-Blade, Morton Machines, N0.0 DUP (Figura 3.14), que produz uma dispersão uniforme do pó no ligante, através de pás aquecidas com configuração específica que, em rotação contrária, proporcionam a obtenção de uma mistura o mais homogénea possível. Neste caso, o ligante previamente pesado, foi introduzido na câmara de mistura e misturado, a uma baixa velocidade de rotação das pás (30 r.p.m.) a uma temperatura pré programada de 140°C, até o seu completo amolecimento. Cerca de metade do total do pó de alumina foi então adicionado e mexido durante 30 minutos. Em seguida, adicionou-se, de forma gradual (3 adições), a outra metade, com intervalos de 15 a 20 minutos entre cada adição (Figura 3.15). Após a introdução da última parte do pó, aumentou-se a velocidade de rotação e a temperatura para 60 rpm e 160°C, respectivamente, para facilitar o processo de mistura.

Finalmente, desligou-se o sistema de aquecimento de modo a permitir a granulação da mistura (Figura 3.16).



Figura 3.14: Misturadora Z-BLADE.



Figura 3.15: Processo de mistura na câmara da misturadora Z-BLADE.

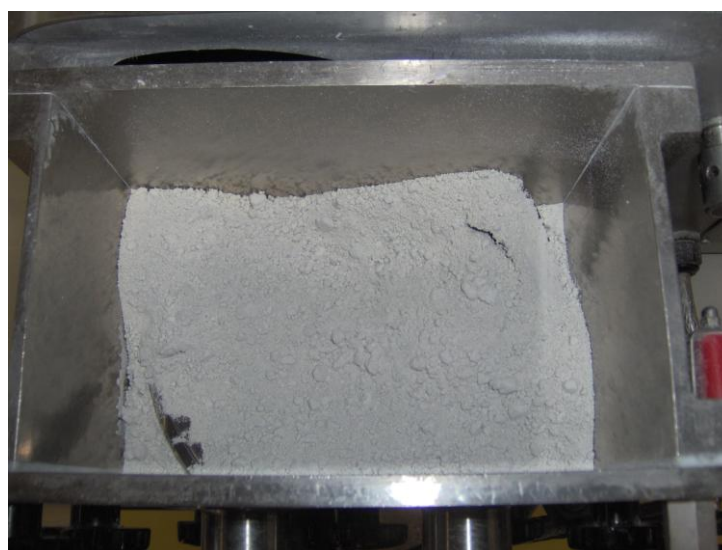


Figura 3.16: Granulação da mistura na câmara da misturadora Z-BLADE.

3.3.3 - Avaliação da homogeneidade da mistura

As misturas preparadas na misturadora Z-Blade foram avaliadas em termos de homogeneidade e de concentração de alumina realmente existente na mistura, através da medição da perda de massa do ligante a uma temperatura de 600°C, durante uma hora. A perda de massa é determinada com base na medição da massa das amostras antes e após a

eliminação do ligante. Para a realização destas análises foram consideradas cinco amostras de aproximadamente 2 g, cada uma, retiradas de cada uma das misturas e sujeitas a ciclos de eliminação de ligante. Os resultados dos ensaios de perda de massa de ligante e o respectivo desvio padrão são indicados na Tabela 3.4. Os baixos valores de desvio padrão associados aos valores médios de perda de massa indicam um elevado grau de homogeneidade das misturas (Raman et al, 1993). Uma importante vantagem destes testes é a possibilidade de se conhecer a verdadeira concentração de alumina nas misturas preparadas (Tabela 3.4). Estes valores são similares aos esperados teoricamente devido ao rigor dos procedimentos experimentais.

Tabela 3.4: Valores médios de perda de massa e concentração de pós para as diferentes misturas.

Misturas	Perda de massa $\pm \sigma$ (massa.%)	Concentração de pós $\pm \sigma$ (vol.%)
1200-56%	18,24 \pm 0,007	55,71 \pm 0,012
1200-58%	17,13 \pm 0,020	57,58 \pm 0,034
1200-60%	15,91 \pm 0,018	59,74 \pm 0,033
3000-54%	19,39 \pm 0,023	53,97 \pm 0,037
3000-56%	18,13 \pm 0,004	56,02 \pm 0,006
3000-58%	17,00 \pm 0,014	57,92 \pm 0,024

A homogeneidade das diversas misturas foi também avaliada por microscopia electrónica de varrimento utilizando o sistema Leica. As Figuras 3.17 e 3.18 mostram as micrografias da superfície de fractura das misturas. Como se pode constatar pela observação das imagens, de um modo geral, o pó está uniformemente disperso no ligante. Contudo, as misturas contendo um teor de pós mais elevado apresentam alguma porosidade, revelando ainda a presença de alguns aglomerados, devido à maior dificuldade em dispersar o pó no ligante. Este facto é muito mais evidente para as misturas preparadas com a alumina 3000, nomeadamente a mistura 3000-58%, dado o menor tamanho das partículas.

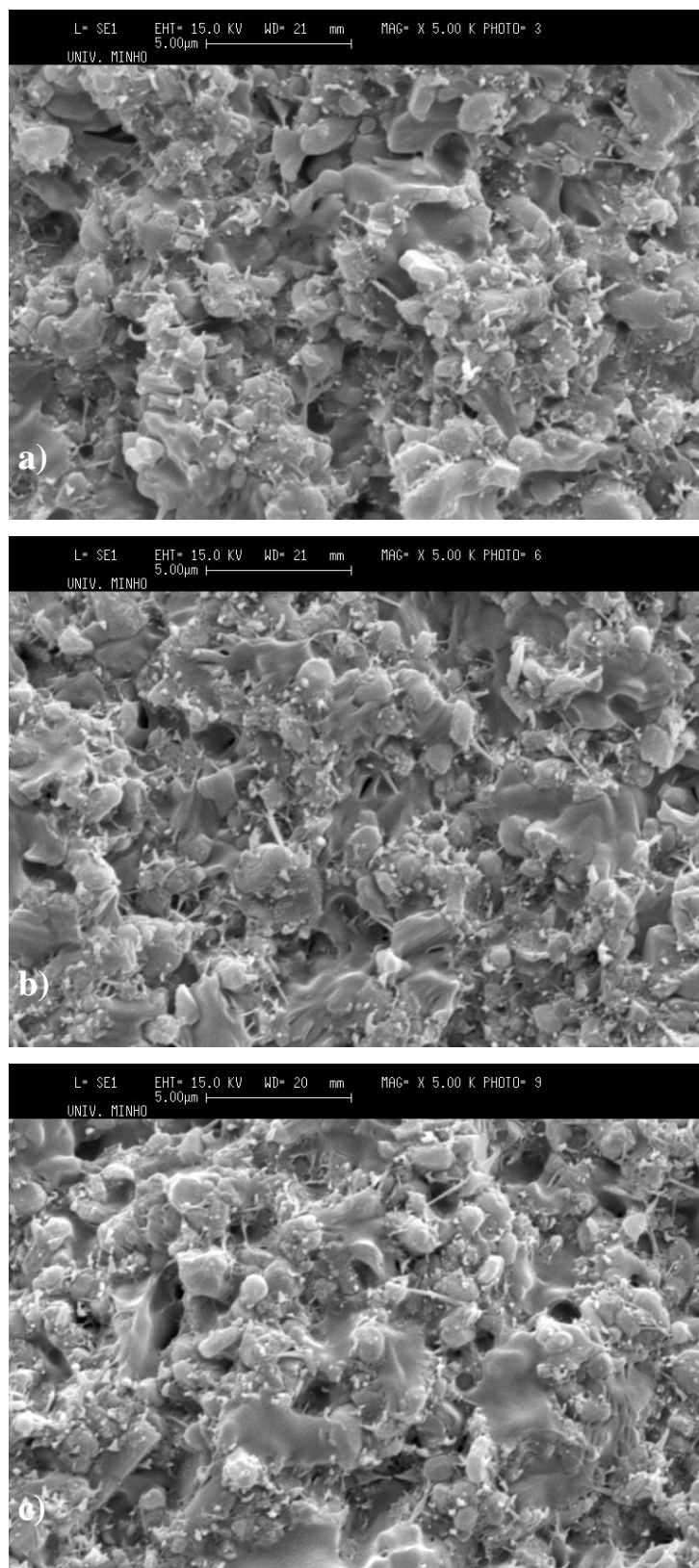


Figura 3.17: Micrografias da superfície de fractura das misturas de alumina 1200 SG: a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60% (ampliação 5000X).

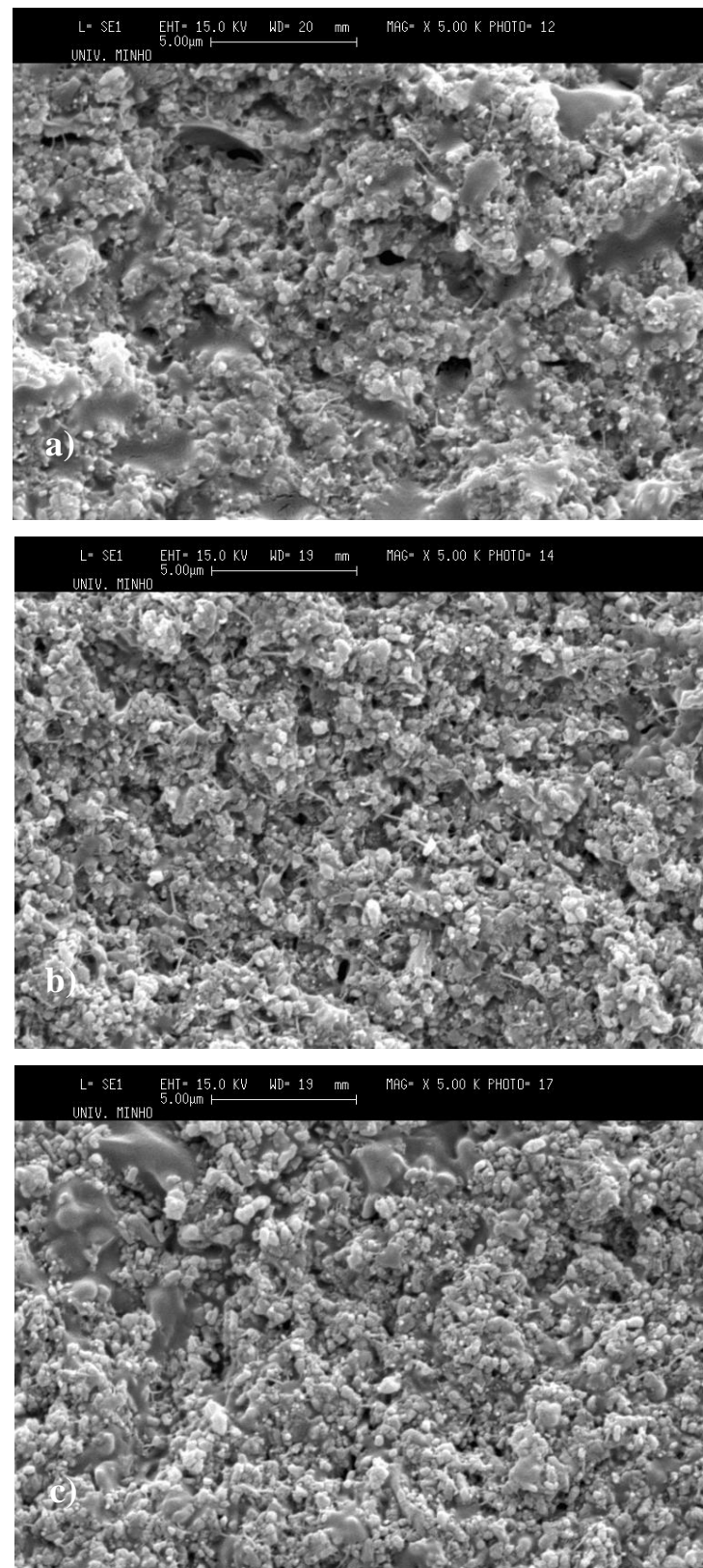


Figura 3.18: Micrografias da superfície de fractura das misturas de alumina 3000 SG: a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58% (ampliação 5000X)

CAPITULO 4:

FABRICO DA PLATAFORMA DE EXTRUSÃO E RESULTADOS

4.1 - Introdução

Este capítulo descreve o trabalho de concepção e fabrico da plataforma de extrusão de misturas. São igualmente, apresentadas algumas das estruturas de geometria simples produzidas e avaliados aspectos relacionados com as condições de processamento e a influência que sobre estas condições tem a composição da mistura. A influência da composição da mistura em termos das morfologias das estruturas obtidas é igualmente objecto de análise.

4.2 - Plataforma de extrusão

A plataforma de extrusão compreende duas unidades fundamentais:

- **Unidade de extrusão:** tem por função a deposição por extrusão das misturas;
- **Plataforma de construção:** plataforma móvel para a construção camada a camada dos componentes.

A unidade de extrusão foi concebida, tomando em conta, as seguintes características e requisitos:

- Unidade robusta e compacta;
- Existência de uma câmara interna de fácil acesso para colocação das misturas;
- Existência de pressões de trabalho elevadas no interior da câmara;
- Existência de um cilindro pneumático que crie pressão e seja ao mesmo tempo resistente a altas temperaturas;
- Existência de uma válvula de controlo do cilindro;

- Sistema de aquecimento da câmara (até 160°C) e respectivo controlo;
- Possibilidade de utilização de fieiras com diâmetros diferentes;
- Material de construção com elevada condutividade térmica para proporcionar um aquecimento homogéneo da mistura. Para tal seleccionou-se o bronze;
- Fácil manutenção e limpeza no fim de cada operação.

A plataforma móvel, robusta e compacta, apresenta capacidade para realizar movimentos com algum rigor segundo os três eixos cartesianos (X,Y,Z). Apresenta, igualmente, elevada estabilidade dimensional e uma área de trabalho de 200X200X200mm. Por questões de peso da estrutura, o material seleccionado para a construção da plataforma foi o alumínio.

Para avaliação de soluções construtivas foram realizados vários esboços do equipamento e avaliados aspectos relacionados com a facilidade de construção, manutenção e substituição de componentes, custos e funcionalidade (Figura 4.1). Uma vez definido o conceito em termos gerais, procedeu-se ao seu dimensionamento e modelação da estrutura de todos os seus componentes (Figuras 4.2 e 4.3) – ver igualmente o Anexo I e II. Para o trabalho de modelação utilizou-se o software Unigraphics.

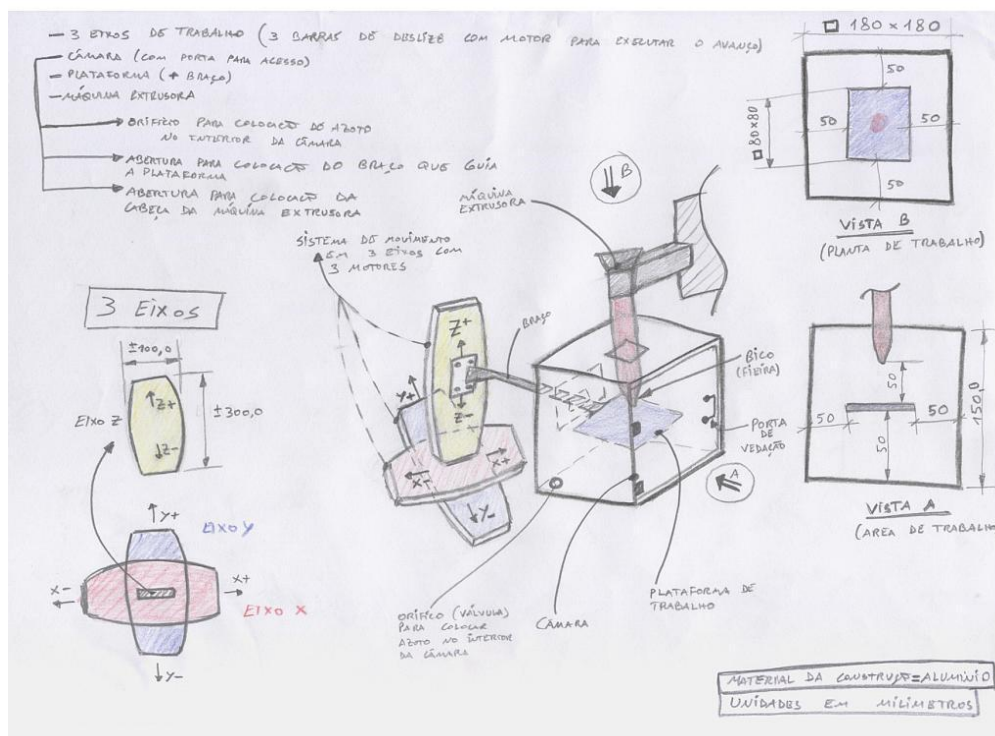


Figura 4.1: Esboço do equipamento e alguns detalhes.

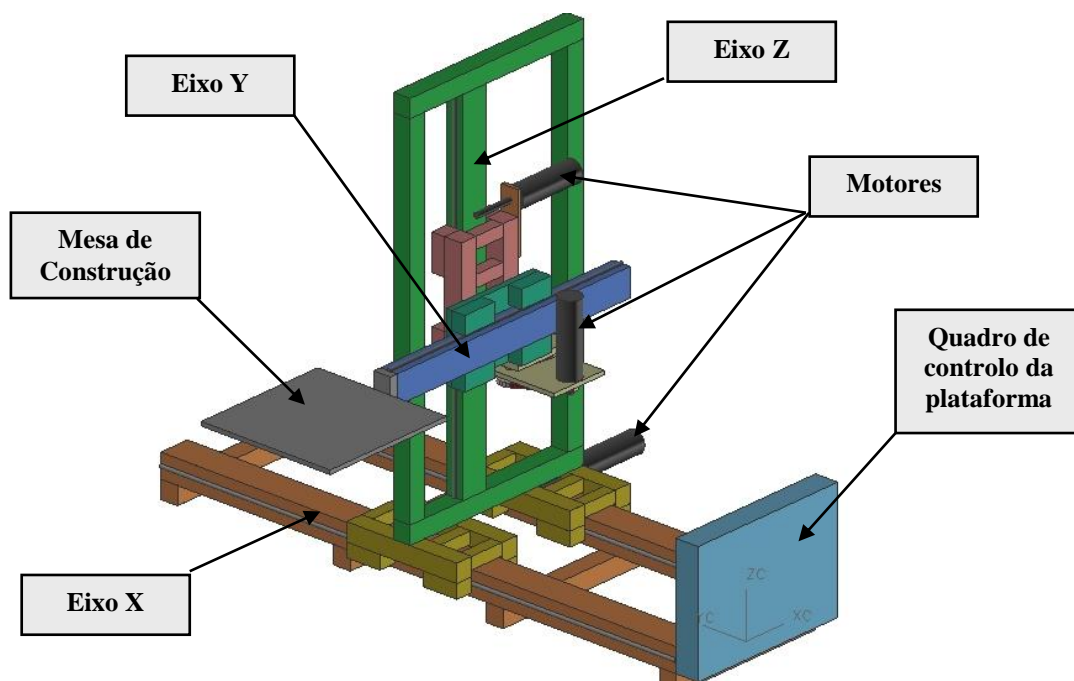


Figura 4.2: Modelação 3D da plataforma.

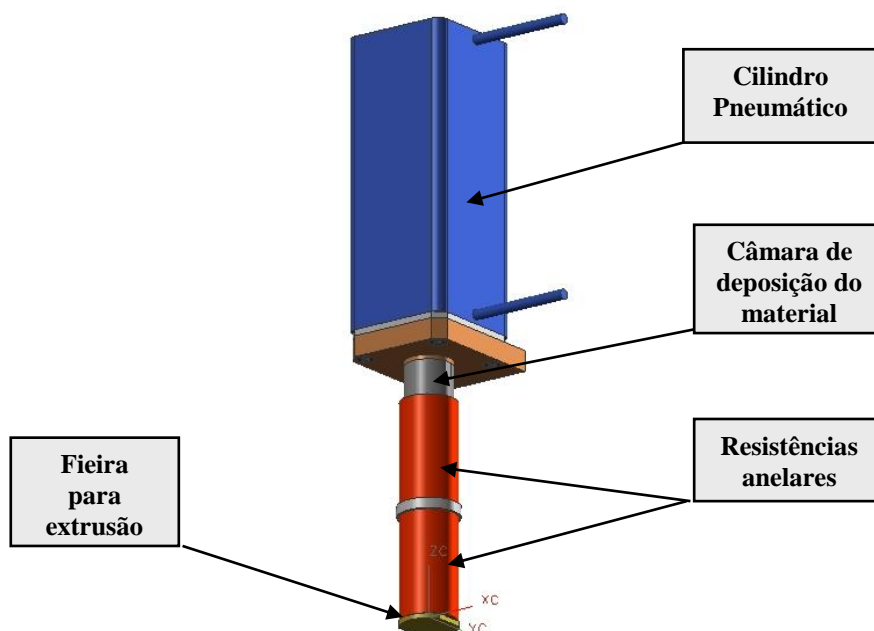


Figura 4.3: Modelação 3D da unidade de extrusão.

Após o trabalho de concepção e projecto do sistema, procedeu-se à sua fabricação. Para a construção da câmara da unidade de extrusão onde é depositada a mistura foi seleccionado o Bronze CB2, pois trata-se de um material com boa condutividade térmica permitindo uma boa uniformização da distribuição da temperatura de processamento. A câmara de extrusão é constituída por um cilindro onde é colocado o material e uma fieira, roscada numa das extremidades, através da qual é extrudido o material a processar (Figura 4.4). A fieira possui geometria circular e diâmetro de 1 mm.



Figura 4.4: Câmara de deposição das misturas e fieira.

Para o aquecimento da câmara de deposição foram seleccionadas duas resistências anelares de 600W e 230V, assim como 2 termopares tipo J acoplados às resistências e que permitem a leitura e controlo da temperatura (Figura 4.5 e 4.6).



Figura 4.5: Resistências anelares e termopares colocados na câmara.



Figura 4.6: Controlador de temperatura.

A câmara possui igualmente um cilindro pneumático (cilindro 31M-80 da CAMOZZI) que permite a aplicação da pressão de compressão requerida no interior da câmara. Uma chapa de material isolante, ISOVAL 10R, laminado de fibra de vidro impregnado com resina epoxídica muito utilizada na indústria de moldes foi colocada entre a câmara e o cilindro, permite reduzir ao mínimo a transferência de calor da câmara para o cilindro (Figura 4.7). Foi igualmente utilizada uma válvula 2/3 da CAMOZZI para controlar a entrada de ar no cilindro, definindo se o êmbolo avança ou recua (Figura 4.8). Para as ligações entre o

cilindro pneumático, a válvula 2/3 e o compressor foram utilizados tubos flexíveis e ligações de 1/8". A extrusora e unidade de extrusão utilizadas estão indicadas nas Figuras 4.9 e 4.10.

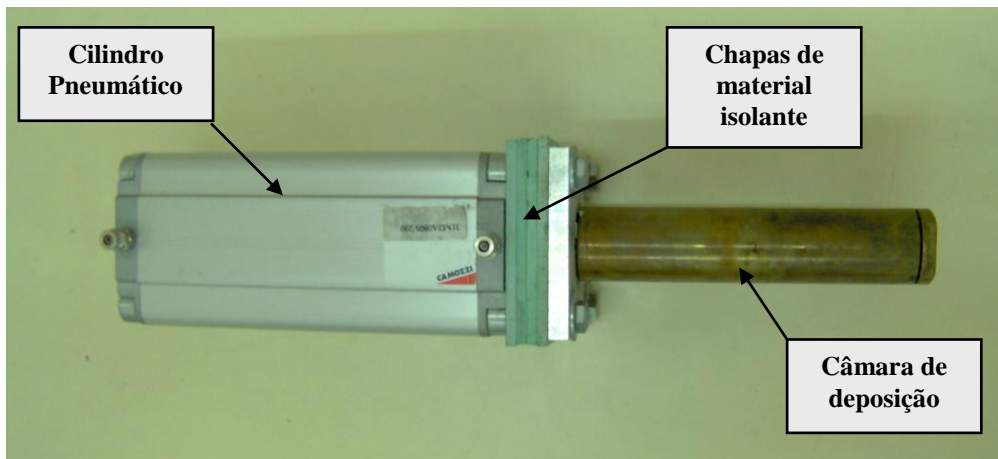


Figura 4.7: Cilindro acoplado à câmara.



Figura 4.8: Válvula 2/3 usada para controlar a entrada de ar no cilindro.

Para a construção da plataforma de construção foram utilizados perfis de alumínio BOSCH (Figura 4.11) que permitem a construção de sistemas de média complexidade de forma simples e precisa. A plataforma apresenta movimento segundo os três eixos cartesianos graças a motores DC, sendo a tracção aplicada ao sistema através de cremalheiras. Os eixos deslizam sobre um varão redondo em aço polido através de um sistema de rodas com

rolamentos que permitem um ajuste em altura, eliminando-se folgas entre eixos. Possuem ainda esponjas de limpeza para eliminar qualquer sujidade nos varões e evitar a sua oxidação. Para tal, foi necessário proceder-se à construção de sistemas de deslize, construção de carrinhos para os 3 eixos, maquinação de chapas em alumínio para fixação dos motores, assim como de todo um conjunto de pequenas peças para fixação do conjunto.

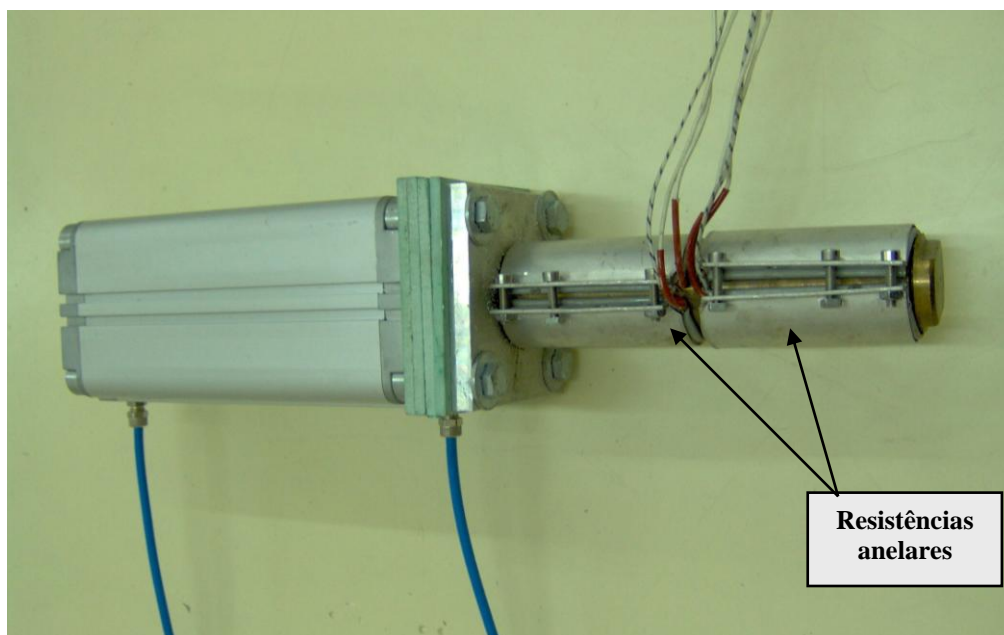


Figura 4.9: Extrusora.

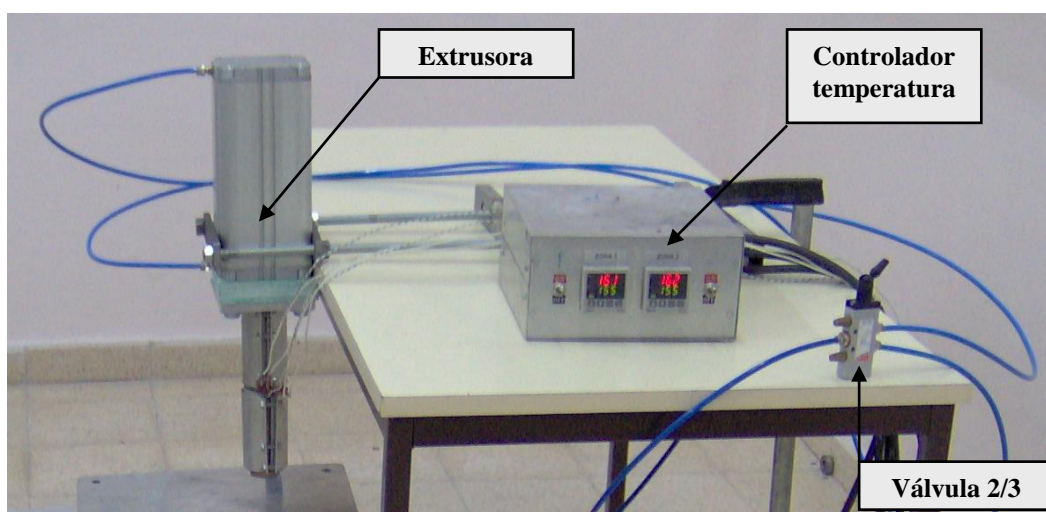


Figura 4.10: Unidade de extrusão.



Figura 4.11: Perfis de alumínio BOSCH utilizados na construção da plataforma.

Cada um dos eixos da plataforma possui um moto-redutor para efectuar o respectivo movimento. Esse moto-redutor é constituído por um redutor e um motor, tendo um taco gerador incorporado. Por questões de simplicidade utilizaram-se motores e redutores existentes no Laboratório de Tecnologia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. Os motores utilizados (SIBONI F.lli, Itália) têm uma potência de 21 Watts, são alimentados a 24 V AC e possuem uma velocidade máxima de rotação de 1950 R.P.M. Os redutores estão directamente ligados aos motores, tendo como entrada a velocidade do motor e como saída a entrada dividida pela redução do redutor. A redução dos redutores é de 216. Na Figura 4.12 apresenta-se um conjunto motor-redutor e quatro polis encadeadas com correias responsáveis pelo movimento de um eixo. Por questões de segurança foram colocadas guias de cabos do tipo lagarta em todos os eixos (Figura 4.12).

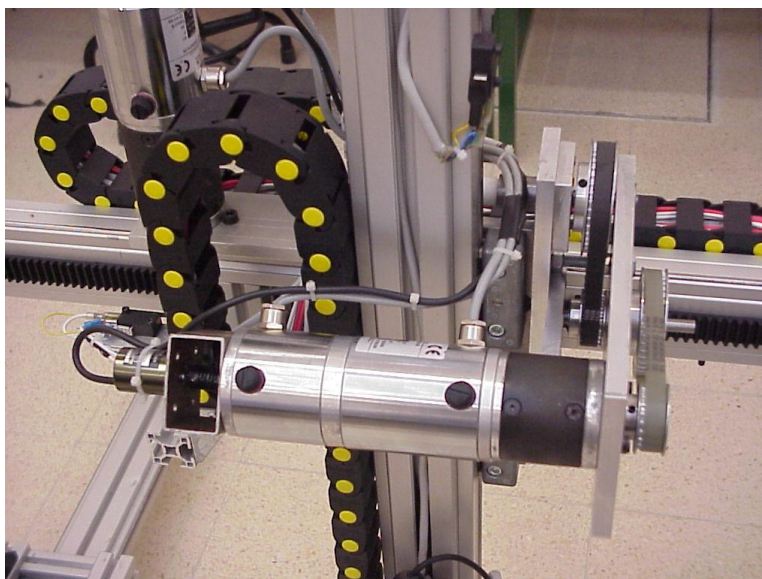


Figura 4.12: Sistema de polias com correias.

Os motores responsáveis pelo movimento dos 3 eixos da plataforma são comandados individualmente por um driver próprio (Figura 4.13). O driver de cada um dos motores é o circuito de potência do respectivo motor, sendo alimentado por uma tensão exterior ao circuito de comando e está constantemente em tensão independentemente do estado dos motores. Este circuito de potência permite, além do controlo de velocidade do motor, o ajuste das rampas de aceleração e desaceleração em arranques, paragens e variações de velocidade do motor.

Os drivers têm como função enviar a potência necessária ao respectivo motor em cada instante, de modo a que, este rode à velocidade desejada. Deste modo é fornecido um sinal de controlo à placa e esta envia para o motor a potência correspondente ao sinal recebido. O referido sinal não é mais do que uma tensão analógica entre -10 e $+10$ V DC, que a cada valor faz corresponder uma velocidade diferente. O sinal de controlo divide-se, ainda, em duas componentes sendo as tensões entre -10 e 0 V as responsáveis pelas velocidades num sentido de rotação e as tensões entre 0 e $+10$ V no outro. Quando o sinal de comando é de zero Volt o motor está parado.

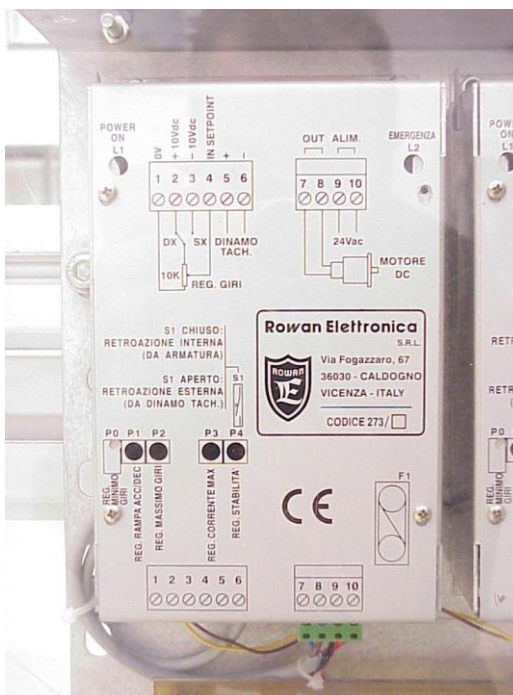


Figura 4.13: Drivers de controlo de motores DC.

O interface entre o computador (unidade de gestora de todo o sistema) e os motores é feito com o auxílio da placa de aquisição de dados DT2811 e foi efectuado em colaboração com o Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEE) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria (ESTG/IPLEI). Esta placa permite o envio de 2 sinais analógicos, quando são necessários 3 sinais para o comando dos motores (1 por cada motor). Para se contornar este problema utilizou-se uma desmultiplexagem de sinais analógicos efectuada por intermédio de um circuito integrado 4052B.

As diferentes placas utilizadas no sistema (placa de leitura de encoders, placa de controlo de motores e fim-de-curso, etc.), foram igualmente produzidas no DEE da ESTG/IPLEI (ver Figuras 4.14 e 4.15). Na Figura 4.16 apresenta-se o quadro de controlo da plataforma. O programa para movimentação da plataforma foi desenvolvido em LabWindows.

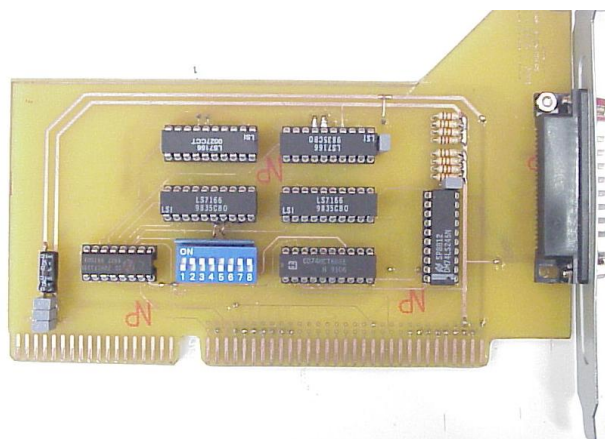


Figura 4.14: Placa de leitura de encoders.

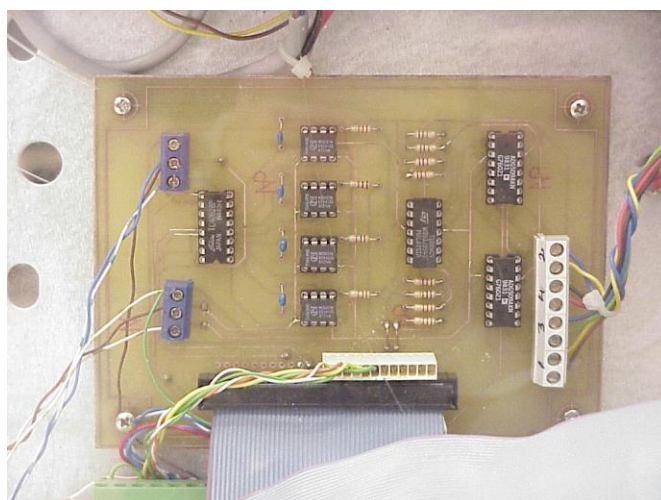


Figura 4.15: Placa de controlo de motores e fim-de-curso.

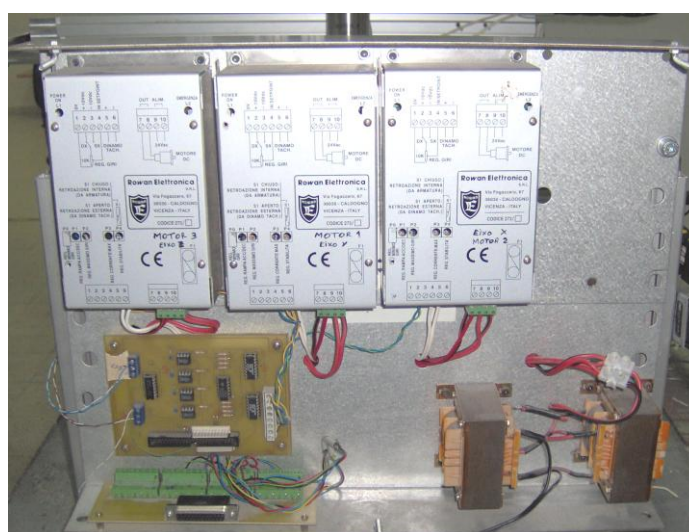


Figura 4.16: Quadro de controlo.

Na Figura 4.17 apresenta-se a plataforma móvel uma vez montada enquanto o conjunto plataforma-extrusora é apresentado na Figura 4.18.

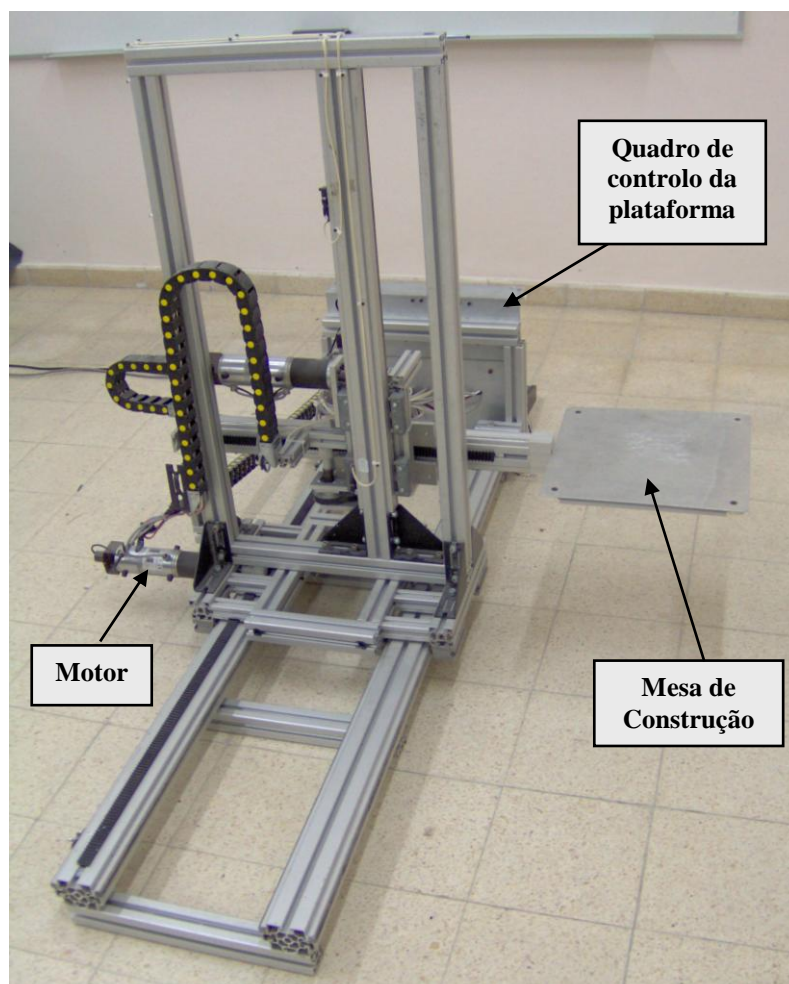


Figura 4.17: Plataforma móvel.

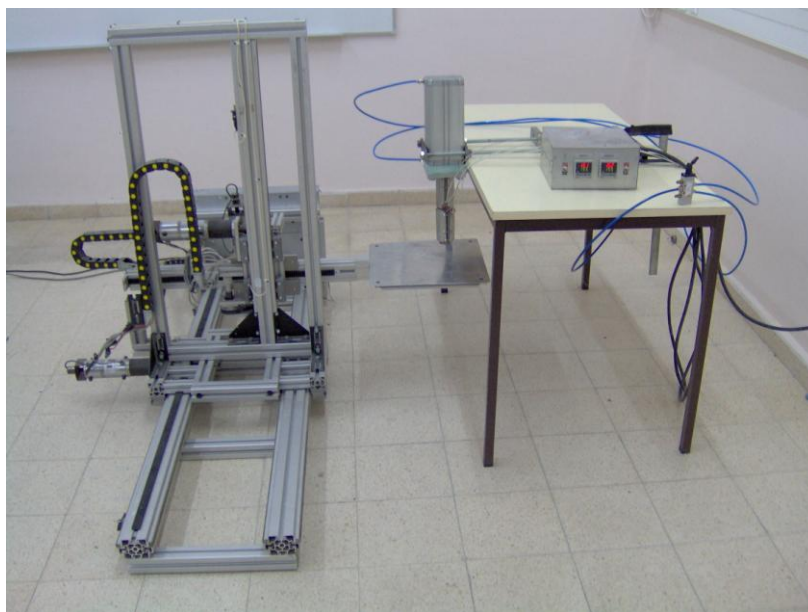


Figura 4.18: Plataforma de extrusão.

4.3 - Resultados experimentais

Uma vez obtida uma estrutura para a deposição por extrusão de misturas cerâmicas, e após o estudo efectuado sobre as etapas de optimização e de preparação da mistura (Capítulo 3), procedeu-se à deposição de filamentos cerâmicos para diferentes condições de processamento.

No processo de prototipagem por extrusão de cerâmicos, os componentes são produzidos camada a camada. Após a etapa de construção, os objectos produzidos (peça verde) são submetidos a etapas de remoção do ligante e sinterização para consolidação final do produto. Estas duas últimas etapas do processo não são objecto de análise neste trabalho.

4.3.1 - Condições de processamento

Com base nas características dos materiais a processar (ver Capítulo 3), os testes de extrusão iniciaram-se com a mistura 3000-54%, porque sendo a que apresentava maior percentagem de ligante permitia, à partida, maior facilidade de processamento.

O processo de extrusão foi realizado em várias fases. Primeiro, colocou-se uma porção de mistura no interior da câmara da extrusora, tendo-se aguardado um certo período de tempo (± 30 minutos) para que todo o interior da câmara atingisse uma temperatura homogénea. Em seguida, aplicou-se pressão no interior da câmara com o duplo objectivo de extrair o ar do seu interior e de permitir a extrusão da mistura. As diferentes operações de extrusão foram realizadas nas mesmas condições de processamento, usando-se uma fieira de perfil circular com 1 mm de diâmetro. Durante o processamento, as misturas foram aquecidas a 160°C, a plataforma foi mantida à temperatura ambiente e a pressão de extrusão foi de 6 bar (Tabela 4.1). Foram igualmente testadas extrusões com o material aquecido a 140°C, no entanto, não se obtiveram bons resultados.

Tabela 4.1: Condições de processamento.

Temperatura de aquecimento da mistura	160°C
Temperatura na área de deposição	25°C
Pressão de extrusão	6 bar

4.3.1.1 - Avaliação do comportamento das misturas

As misturas preparadas tal como descrito no Capítulo 3 foram extrudidas nas condições indicadas na Tabela 4.1. Para a mistura 3000-54%, a extrusão decorreu sem dificuldade dada a quantidade de ligante. Contudo, obtiveram-se alguns problemas na definição de trajectórias de deposição com ângulos rectos (Figura 4.19) e os filamentos obtidos uma vez solidificados apresentavam-se bastante frágeis, quebrando-se com alguma facilidade. O aumento da quantidade de pó cerâmico na mistura resultou, tal como esperado, numa maior dificuldade de extrusão. Com as misturas 3000-56% (Figura 4.20) e 3000-58% (Figura 4.21) não foi possível obterem-se filamentos contínuos ocorrendo quebra de continuidade pouco tempo após a saída do material da fieira. No caso da mistura 3000-58% o processamento foi mais difícil que no caso da mistura 3000-56%, observando-se velocidades de extrusão mais baixas.

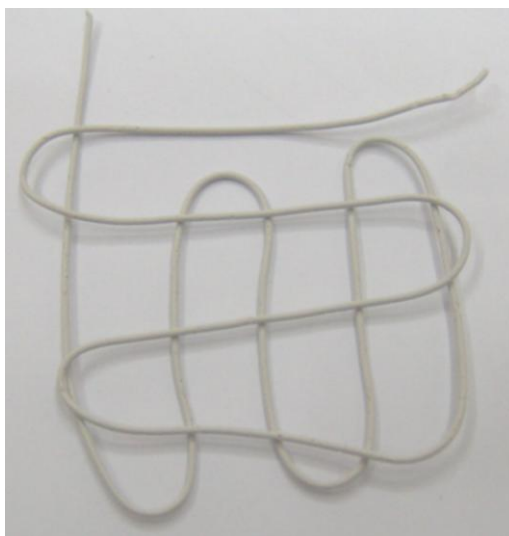


Figura 4.19: Estrutura obtida por extrusão da mistura 3000-54%.



Figura 4.20: Extrusão da mistura 3000-56%.



Figura 4.21: Extrusão da mistura 3000-58%.

Para a mistura 1200-56%, a extrusão decorreu sem dificuldade, tendo sido possível obter alguns filamentos (Figura 4.22). Com esta mistura não foi possível a definição de configurações apresentando ângulos rectos. Nos diferentes ensaios de extrusão foi possível observar uma boa adesão entre filamentos. O aumento da concentração de cerâmica tornou mais difícil o processo de extrusão e menor o grau de adesão entre filamentos. Na Figura 4.23 apresenta-se uma estrutura obtida por extrusão da mistura 1200-60%. Os resultados obtidos permitiram ainda verificar ser possível extrudir misturas com um maior teor de pós, quando se utiliza alumina CT 1200 SG.

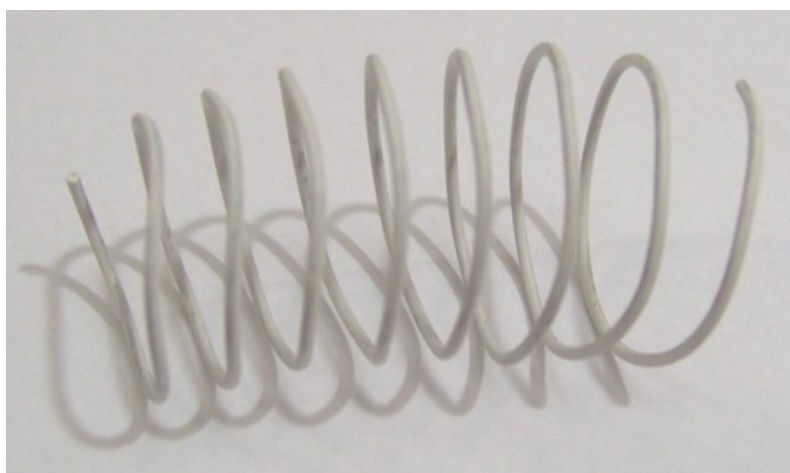


Figura 4.22: Estrutura obtida por extrusão da mistura 1200-56%.

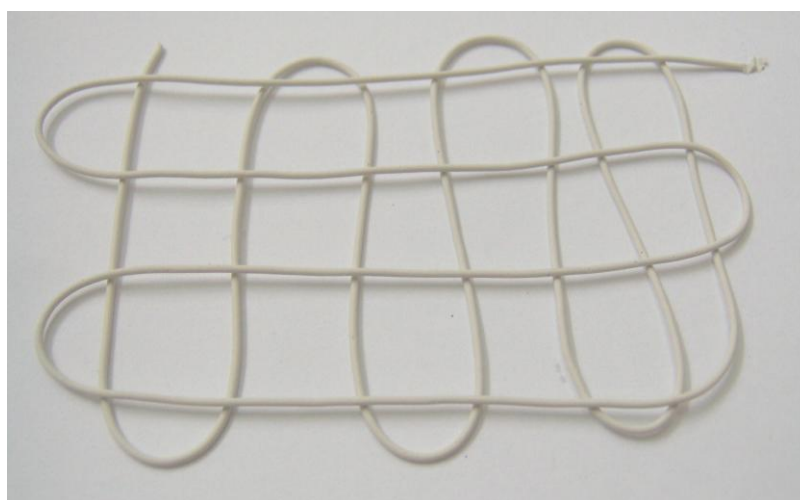


Figura 4.23: Estrutura obtida por extrusão da mistura 1200-60%.

4.3.1.2 - Análise da morfologia dos filamentos extrudidos

Nas figuras 4.24 a 4.27 apresentam-se as micrografias da superfície externa de filamentos correspondentes às misturas em análise, com diferentes ampliações. As micrografias foram obtidas através da utilização de um sistema de microscopia electrónica de varrimento (Leica). A superfície de fractura dos filamentos é indicada nas Figuras 4.28 a 4.31.

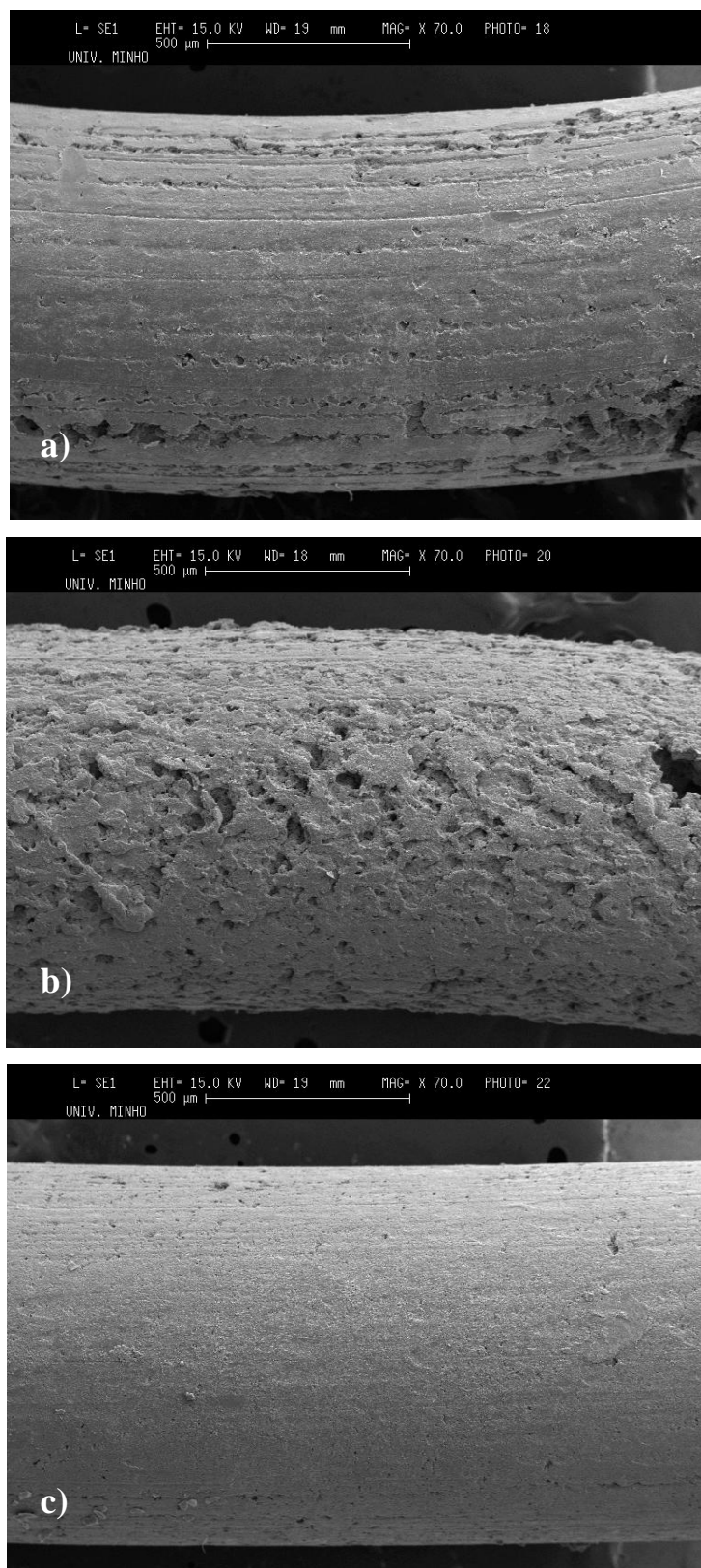


Figura 4.24: Micrografias da superfície dos filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60%. Ampliação 70X.

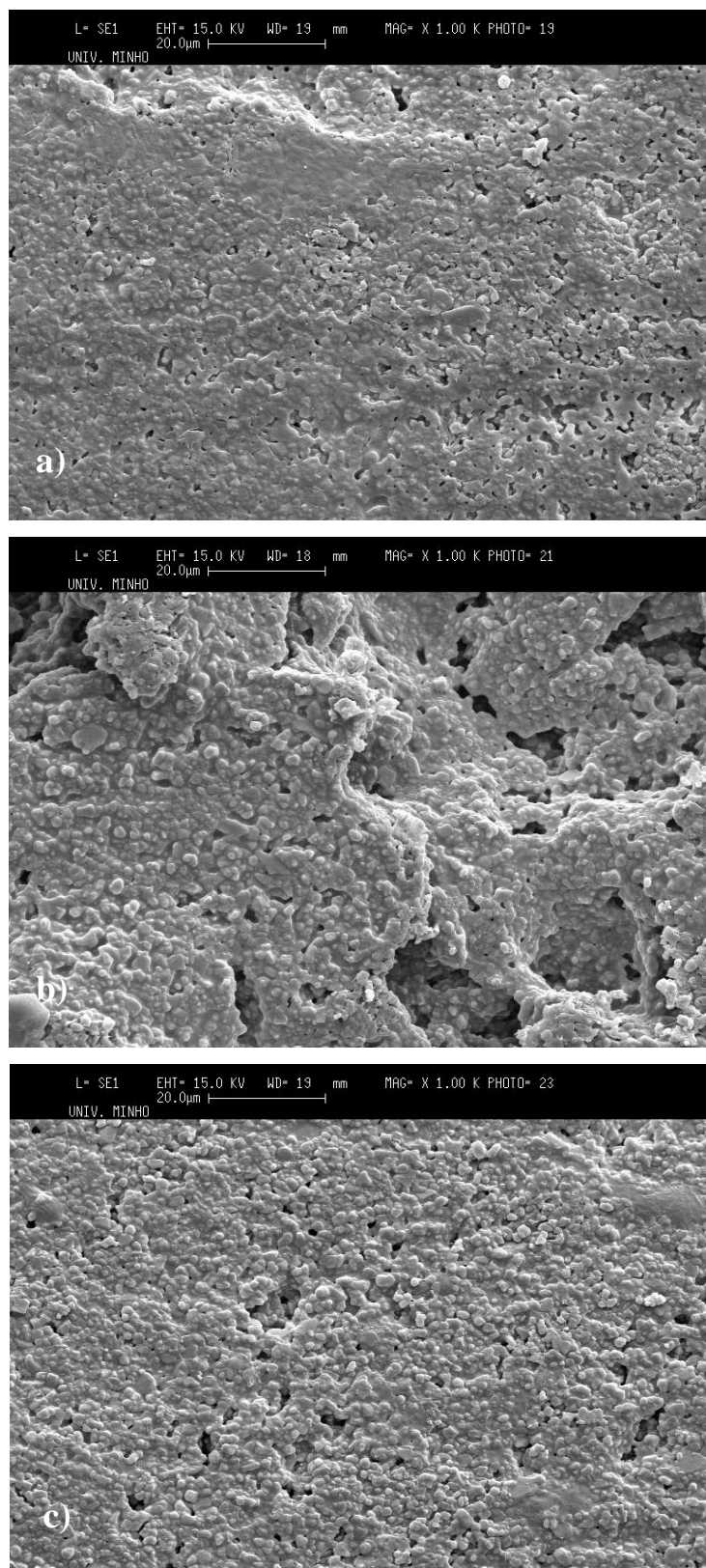


Figura 4.25: Micrografias da superfície dos filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60%. Ampliação 1000X.

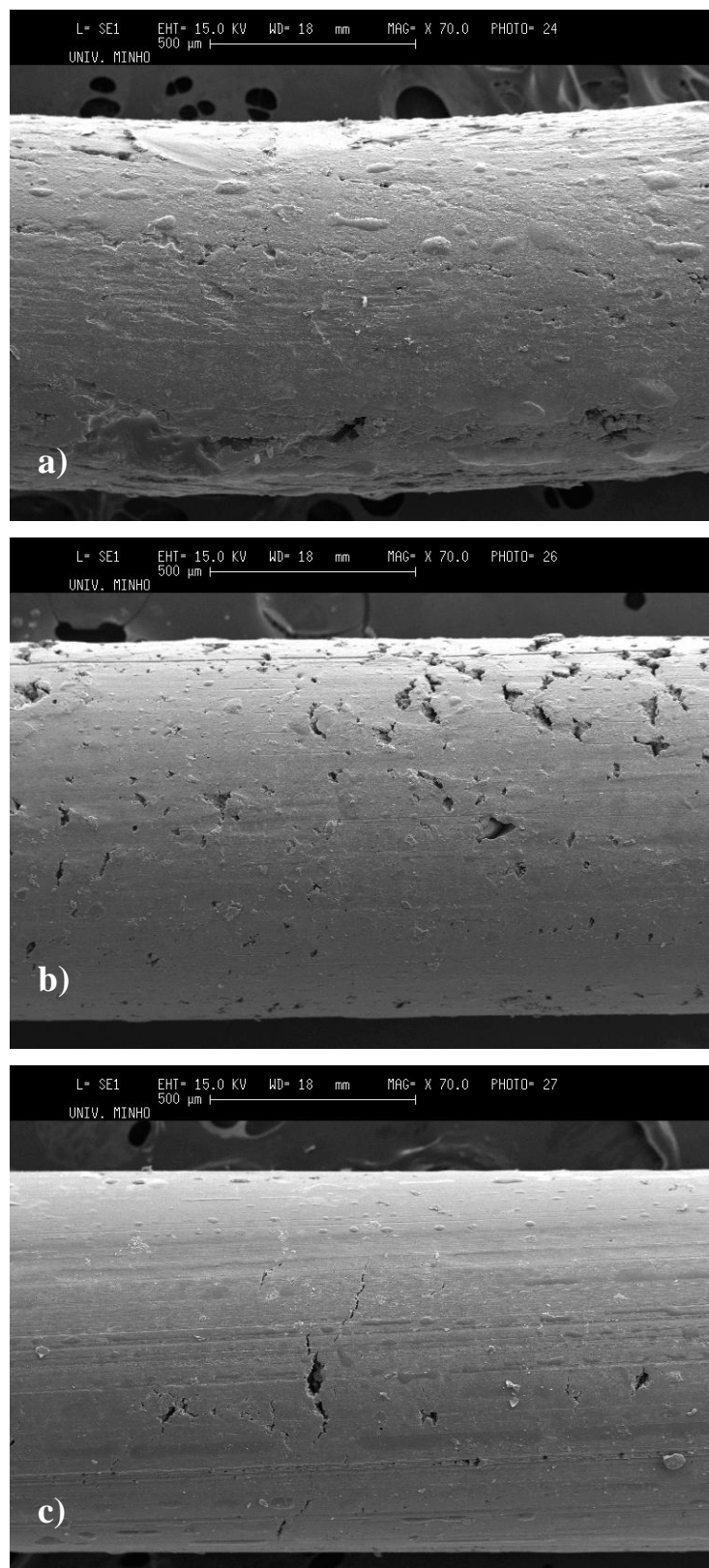


Figura 4.26: Micrografias da superfície dos filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58%. Ampliação 70X.

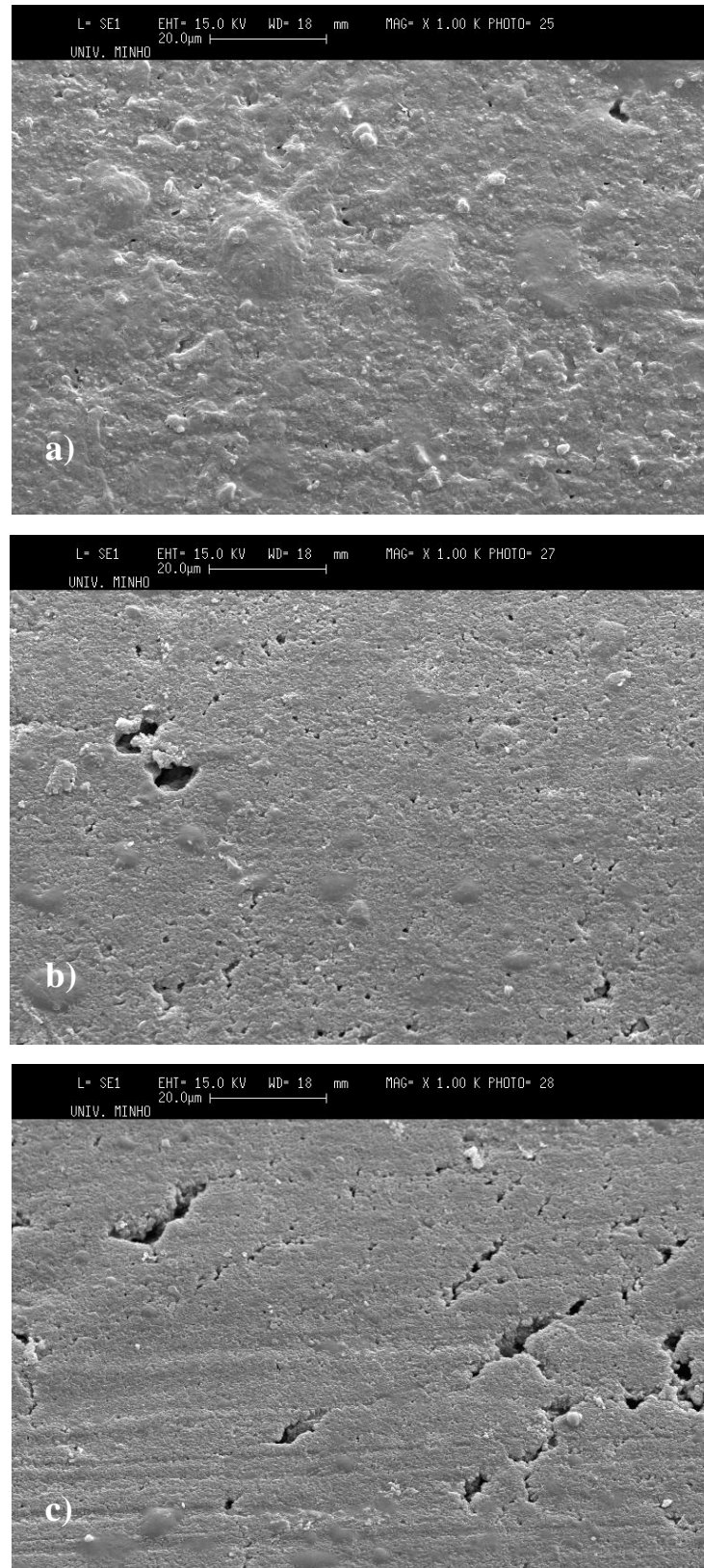


Figura 4.27: Micrografias da superfície dos filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58%. Ampliação 1000X.

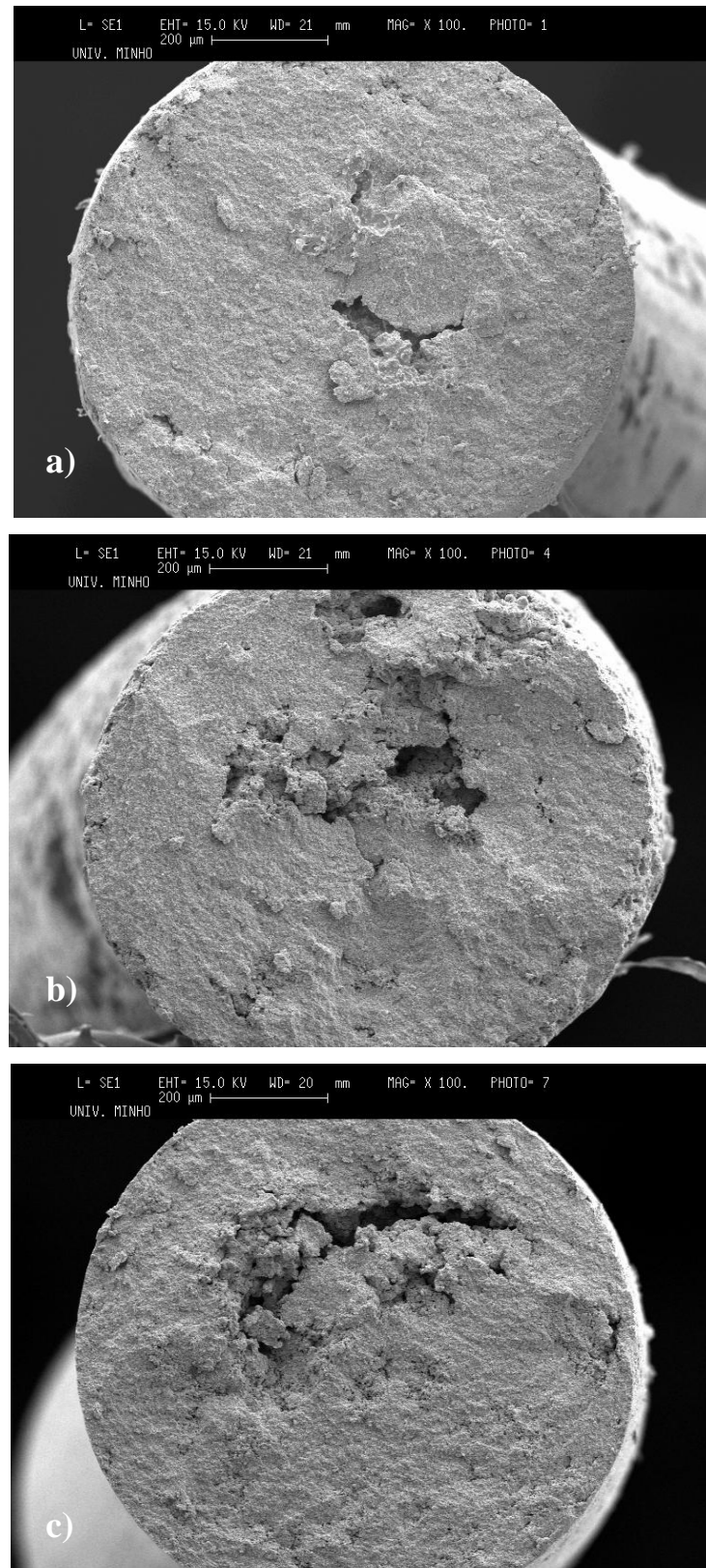


Figura 4.28: Micrografias da zona de fractura de filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60%. Ampliação 100X.

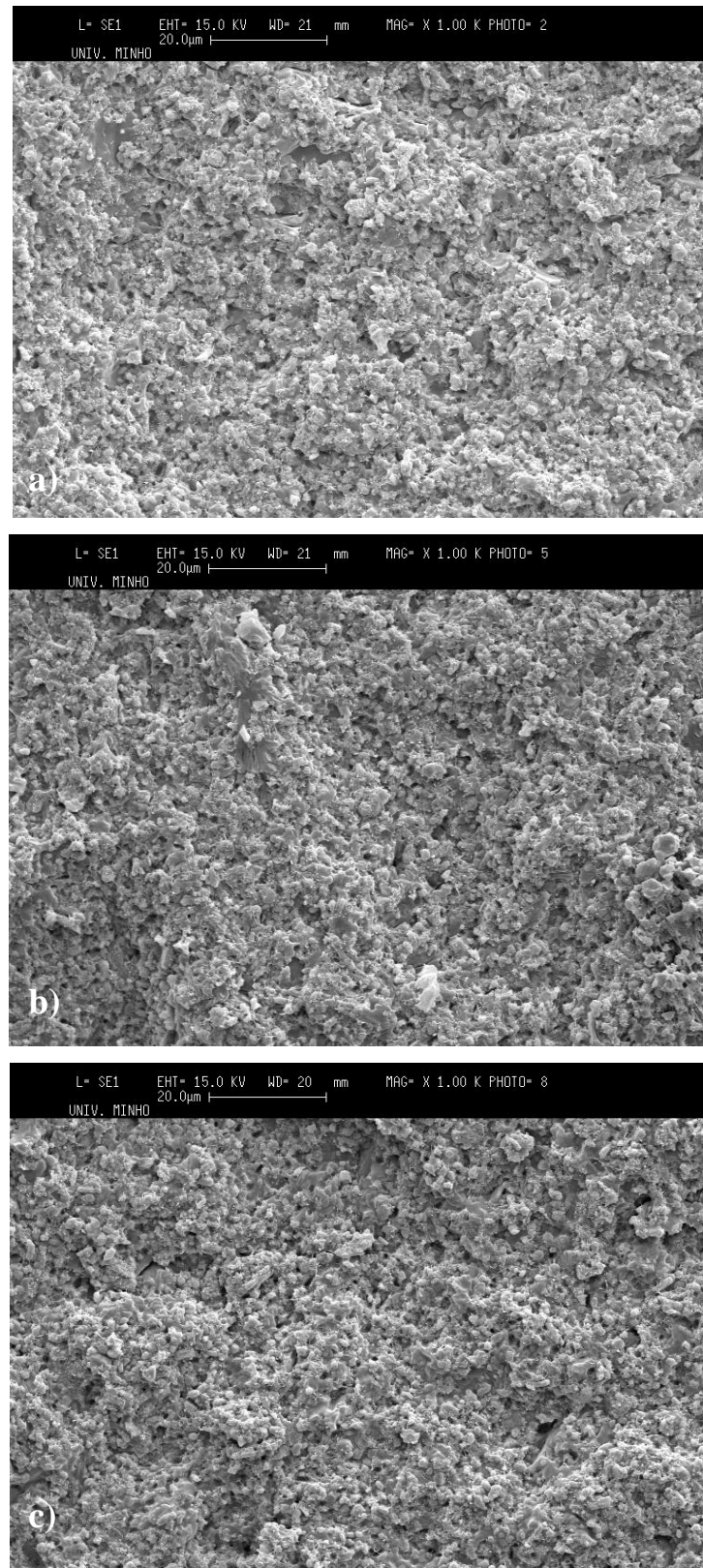


Figura 4.29: Micrografias da zona de fractura de filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 1200-56%, b) 1200-58% e c) 1200-60%. Ampliação 1000X.

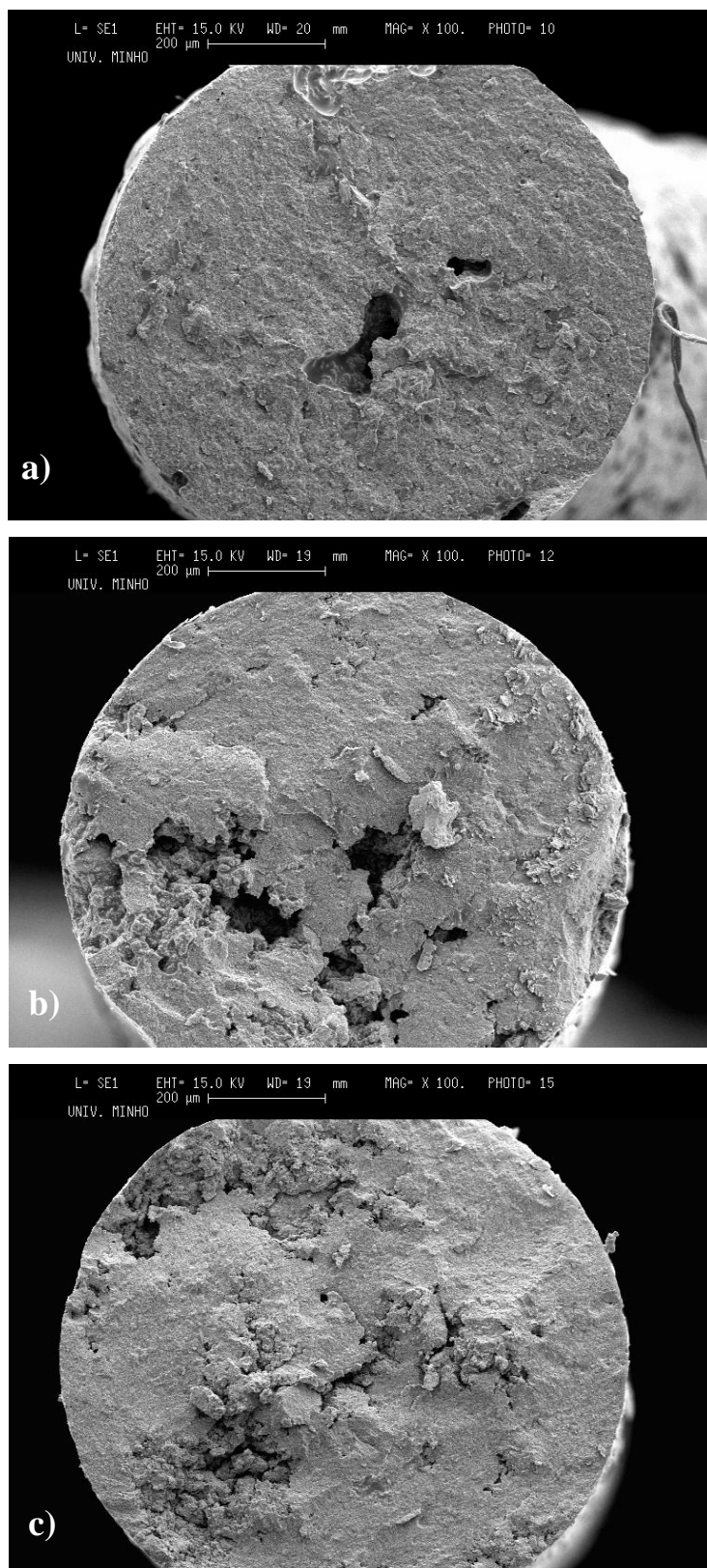


Figura 4.30: Micrografias da zona de fractura de filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58%. Ampliação 100X.

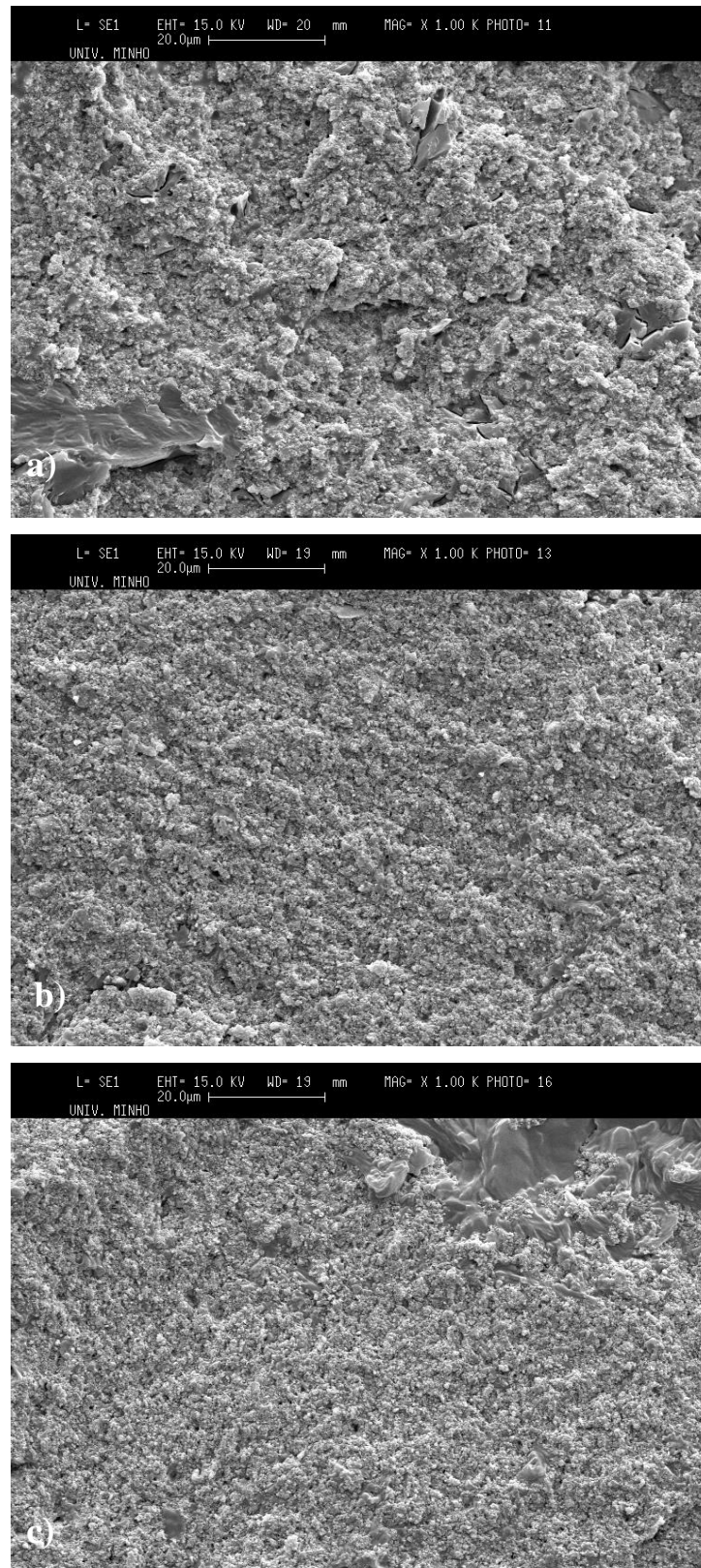


Figura 4.31: Micrografias da zona de fractura de filamentos extrudidos correspondendo às misturas a) 3000-54%, b) 3000-56% e c) 3000-58%. Ampliação 1000X.

As micrografias da superfície externa (Figuras 4.24 a 4.27) mostram que os diferentes filamentos apresentam porosidade superficial, aparentemente menos significativa no caso de misturas contendo maiores concentrações de alumina (misturas 1200-60% e 3000-58%). Contudo, a análise da superfície de fractura (Figuras 4.28 a 4.31) mostra que para misturas contendo maiores concentrações de alumina a estrutura interna é mais heterogénea e mais porosa. Este facto é comprovado pela determinação da densidade aparente, pelo método de Arquimedes. Na verdade, a comparação da densidade aparente com a densidade teórica, avaliada pela lei das misturas, é traduzida por um menor valor de porosidade para os filamentos processados com a mistura de alumina 1200 contendo um menor teor de sólidos (Tabela 4.2). No caso específico da mistura 1200-56%, o valor da densidade aparente é bastante próximo do valor teórico.

Tabela 4.2: Densidade teórica e aparente de filamentos extrudidos a partir de misturas contendo alumina CT1200SG.

Mistura	Densidade teórica (kg/m ³)	Densidade aparente (kg/m ³)	Porosidade (%)
1200-56%	2667	2615 ± 5	2
1200-58%	2719	2514 ± 39	8
1200-60%	2780	2565 ± 62	8

CAPITULO 5:

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 - Conclusões

A obtenção de componentes por prototipagem rápida constitui um importante domínio de investigação. No Capítulo 2, detalhou-se o estado da arte dos processos de prototipagem rápida, apresentando-se as principais vantagens e limitações de cada técnica. Particular destaque foi dado ao processo de extrusão, técnica adoptada neste trabalho de investigação. Uma variável fundamental deste processo é a mistura pó cerâmico/ligante que determina a qualidade dos componentes produzidos e as características do equipamento (temperatura de mistura, pressão, etc.). Deste modo, diversas misturas de alumina com ligante foram criteriosamente definidas, constituídas por duas aluminas técnicas (CT1200SG e CT3000SG) e várias percentagens de ligante. Na fase de preparação das misturas, descrita no Capítulo 3, procedeu-se à optimização do teor de pós na mistura e ao processo de mistura e granulação, assim como de caracterização das misturas. Uma vez obtidas as misturas, foi desenvolvido um sistema de extrusão constituído por uma unidade de movimento e uma extrusora e processadas algumas estruturas, tal como se descreve no Capítulo 5.

Os principais resultados decorrentes deste trabalho de investigação são:

- A optimização da concentração de sólidos nas misturas, assim como, a respectiva preparação por uma técnica que assegure a sua homogeneidade, são passos cruciais para a obtenção de peças de elevada qualidade. As misturas devem apresentar características reológicas adequadas à extrusão, sendo desejável aliar uma baixa viscosidade a uma elevada concentração de sólidos.

- Quanto mais elevado for o teor de sólidos na mistura mais fácil é o processo de eliminação do ligante e menores serão as variações dimensionais das peças finais.
- Misturas adequadas ao processo de prototipagem rápida por extrusão podem ser obtidas usando-se pós com partículas de maior dimensão e distribuições de tamanho de partículas mais largas, consequentemente, com valores de densidade batida mais elevados. Estes pós permitem a obtenção de misturas com elevadas concentrações de sólidos sem compromisso do seu comportamento reológico.
- O processo de obtenção de misturas adoptado neste trabalho de investigação revelou-se eficaz permitindo a obtenção de misturas homogéneas.

5.2 - Trabalhos futuros

Os trabalhos a desenvolver no futuro passam por um estudo detalhado da etapa de eliminação de ligante e sinterização assim como pelo estudo da influência dos parâmetros de processamento sobre a qualidade das estruturas produzidas. Tal, implicará algumas modificações no sistema de extrusão, que passam, por exemplo, pela utilização de um fuso de modo a garantir-se uma mistura mais homogénea. Deste modo, são objectivos para o futuro:

- i.) Projecto e fabrico de um fuso para colocação no sistema de extrusão.
- ii.) Estudo do processo de eliminação, sinterização e caracterização das estruturas finais (porosidade, densidade, etc.).
- iii.) Determinação do efeito que as condições de processamento têm sobre a qualidade das estruturas obtidas. Como parâmetros a estudar temos:
 - a) velocidade de rotação do fuso
 - b) velocidade de extrusão
 - c) temperatura de aquecimento da mistura e da área de trabalho
 - d) distância entre o bico de extrusão e a plataforma de construção.

Os resultados obtidos neste trabalho de investigação permitiram a elaboração dos seguintes artigos:

MATERIAL CHARACTERIZATION FOR FUSED DEPOSITION OF CERAMICS, F.M. Barreiros, D. Santos e P.J. Bártolo, Virtual and Rapid Manufacturing, Editado por P.J. Bártolo et al, Taylor&Francis, 2008 (ISBN: 0415416027).

DEVELOPMENT OF OPTIMAL FEEDSTOCKS FOR FUSED DEPOSITION OF CERAMICS, D. Santos, F.M. Barreiros e P.J. Bártolo, *RPD 2006 – Building the Future by Innovation*, 2006.

Referências

- Ahn, S. H., Lee, C. S. e Jeong, W. (2004) “Development of translucent FDM parts by post-processing”, *Rapid Prototyping Journal*, 10, 218-224.
- Ahrens, C. H., Ferreira, C. V., Petrusch, G., Carvalho, J., Santos, J. R. L., Silva, V. L. S. e Volpato, N. (2007) “Protótipagem Rápida – Tecnologia e Aplicações” Publicado por Edgar Blucher, Brasil.
- Alcoa Industrial Chemicals, Reactive and Calcined Aluminas for the Ceramic Industry, European Regional Product Data (RP-EU/RCP/006/R04/1005/MSDS387), 2.
- Alisantoso, D., Khoo, L. P., Lee, I. B. H., Lu, W. F. (2006) “A design representation scheme for collaborative product development”, *Int J Adv Manuf Technol*, 30, 30-39
- Alves, N.F. e Bártoło, P.J. (2006) “Integrated computational tools for virtual and Physical automatic construction” *Automation and Construction*, 15, 257-263.
- Alves, N.M.F. e Bártoło, P.J. (2008) “Automatic 3D shape recovery for rapid prototyping”, *Virtual and Physical Prototyping*, 3, 123-127.
- Barreiros, F.M. and Vieira, M.T., (2000) “Recovery of inorganic wastes by PIM”, *Proc. 2nd European Symposium on Powder Injection Molding (EURO PM2000)*.
- Barreiros, F.M.C., (2002) “Optimização da Moldação por Injecção de Pós de Resíduos Industriais Inorgânicos”, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Barth, H. G. (1984) “Modern Methods of Particle Size Analysis”. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Bártoło, P.J. (2001) “Optical approaches to macroscopic and microscopic engineering”, Tese de Doutoramento, Universidade de Reading, Reino Unido.
- Bártoło, P. J. e Mitchell, G. (2003) “Stereo-thermal-lithography: A new principle for rapid prototyping”, *Rapid Prototyping Journal*, 9, 150-156.
- Bártoło, P. J., Jardim, A. L. e Scarparo, M. A. (2004) “ Stereolithographic processes: materials, techniques and applications”, *Proceedings of the 10th European Forum on Rapid Prototyping*, Paris, França.

- Bártolo, P.J. e Galha, H.M. (2001) “Concurrency in Design: A Strategic Approach through Rapid Prototyping”, Proceedings of the CIB World Congress, Wellington, Nova Zelândia.
- Bártolo, P.J. (2010) “Stereolithographic processes”, Stereolithography: Materials, Processes and Applications, Editado por P.J. Bártolo, Springer (no prelo).
- Bártolo, P.J. e Mateus, A. (2002) “O estado da arte dos processos aditivos de prototipagem rápida”, O Molde, Junho, 39-46.
- Bártolo, P.J. e Mateus, A. (2002) “O estado da arte dos processos aditivos de prototipagem rápida: processos estereolitográficos”, O Molde, Setembro, 24-28.
- Bártolo, P.J. (2007) “Photo-curing modelling: direct irradiation”, Int J Adv Manuf Technol 32, 480-491.
- Bártolo, P.J. e Gaspar, J. (2008) “Metal filled resin for stereolithography metal part”, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 57, 235-238.
- Barton, K., Mishra, S., Shorter, K.A., Alleyne, A., Ferreira, P., e Rogers, J., (2010) “A desktop electrohydrodynamic jet printing system”, Mechatronics, 20, 611-616.
- Bidanda, B. e Bártolo, P.J. (2008) “Virtual Prototyping & Bio-manufacturing in Medical Applications”, Springer.
- Carrillo, J. E. e Franza, R. M. (2006) “Investing in product development and production capabilities: The crucial linkage between time-to-market and ramp-up time”, European journal of Operational Research, 171, 536-556.
- Carrión, A. (1997) “Technology forecast on ink-jet head technology applications in rapid prototyping”, Rapid Prototyping Journal, 3, 99-115.
- Cheah, C. M., Chua, C. K., Lee, C. W., Lim, S. T., Eu, K. H. e Lin, L. T. (2002) “Rapid sheet metal manufacturing. Part 2: Direct rapid tooling”, Int J Adv Manuf Technol, 19, 510-515.
- Chiu, Y.Y., Liao, Y.S. e Hou, C.C: (2003) “Automatic fabrication for bridged laminated object manufacturing (LOM) process”, Journal of Materials Processing Technology, 140, 179-184.
- Chua, C. K., Leong, K. F. e Lim, C. S. (2003) “Rapid Prototyping – Principles and Applications”, World Scientific Publishing, Singapura.

Chua, C. K., Gan, G. K. Jacob e Tong Mei (1997) “Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems. Part 2: LMI – An Improved Interface”, *Int J Adv Manuf Technol*, 13, 571-576.

Cryzewski, J., Burzynski, P. e, Gawel, K., Meisner, J. (2009) “Rapid prototyping of electrically conductive components using 3D printing technology”, *Journal of Materials processing Technology*, 209, 5281-5285.

Crump, S. S. (1989) “Apparatus and method for creating three-dimensional objects”, *Patente Norte Americana* nº 5 121 329.

Deckard, C. R. (1986) “Method and apparatus for producing parts by selective sintering”, *Patente Norte Americana* nº 4 863 538.

Feygin, M., Shkolnik, A., Diamond, M. e Dvorskiy, E. (1997) “Laminated object manufacturing system”, *PCT WO 97/39903*.

German, R.M and Bose, A. (1997) “Injection Molding of Metals and Ceramics”, *Metal Powder Industries Federation*, Princeton.

Gibson, I. Rosen. D.W., Stucker, B. (2009), “Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, Nova Iorque.

Goodridge, R.D., Hague, R.J.M. e Tuck, C.J. (2010) “An empirical study into laser sintering of Materials Processing Technology”, 210, 72-80.

Grimm, T. (2004) “User’s Guide to Rapid Prototyping”, *Society of Manufacturing Engineers*, Dearborn, Michigan.

Hardro, Peter J.; Wang, Jy-hone; Stucker, Brent E. (1998) “Determining the parameter settings and capability of a rapid prototype process. Material Fabrication and Properties – Report #2”. *Department of Mechanical Engineering; Swiss Federal Institute of Technology at Lausanne. Lausanne, Switzerland.*

Hull, C. W. (1986) “Method and apparatus for production three-dimensional objects by stereolithography”, *Patente Europeia* nº 0 171 069.

Ibusuki, U. e Kaminski, P. C. (2006) “Product development process with focus on value engineering and target-costing: A case study in an automotive company” *International Journal of Production Economics*, 105, 459-474.

- Jardini, A. L., Filho, R. M., Scarparo, M. A., Andrade, S. R. e Moura, L. F. (2004) “Infrared stereolithography: Prototype construction using special combination of compounds and laser parameters in localised curing process”, *Int J Materials and Product Technology*, 21, 241-254.
- Klosterman, D., Chartoff, R., Graves, G. e Osborne, N. (1998) “Direct fabrication of ceramics and composites through laminated object manufacturing (LOM)”, *Proceedings International SAMPE Symposium and Exhibition*, 43, 693-705.
- Kruth, J.P., Wang, X., Laoui, T. e Froyen, L. (2003) “Lasers and materials in selective laser sintering”, *Rapid Prototyping Journal*, 24, 357-371.
- Kruth, J.P. e Levy, G., Childas, T.H.C. (2007) “Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 35, 730-759.
- Kumas, S. e Kruth, J.P. (2010) “Composites by rapid prototyping technology”, *Materials and Design*, 31, 850-856.
- Lee, K.W. (1999) “Principles of CAD/CAM/CAE Systems”, Addison-Wesley, Reading
- Lewis, J. A. (2002) “Direct-write assembly of ceramics from colloidal inks”, *Current Opinion in Solid State Materials Science*, 6, 245-250.
- Ma, D., Lin, F. e Chua, C. K. (2001) “Rapid prototyping applications in medicine. Part 2: STL file generation and case studies”, *Int J Adv Manuf Technol*, 18, 118-127.
- Masood, S.H e Song, W.Q. (2005) “Thermal characteristics of a new metal/polymer material for FDM rapid prototyping process”, *Assembly Automation*, 25, 309-315
- Mcmahon, C. e Browne, J. (1999) “CAD/CAM: principles, practice, and manufacturing management”, Prentice Hall.
- Mumtaz, K.A. e Hopkinson, N. (2010) “Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 279-287.
- Pham, D. T. e Dimov, S. S. (2003) “Rapid Manufacturing – technologies and applications”, em *Rapid Response Solutions to Product Development*, Editado por S. T. Tan, I. Gibson e Y. H. Chen, Professional Engineering Publishing, Suffolk.

Raman, R., Slike III, W. and German, R.M., (1993) “Experimental Evaluation of the Mixing Process for the Preparation of Feedstock for Powder Injection Molding”, *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 14(11-12), 166-186.

Sachs, E.M., Haggerty, J.S., Cima, M.J., Williams, P.A., (1993) “Three-dimensional Printing Techniques”, US 005 204 055.

Shi, Y., Li, Z., Sun, H., Huang, S. e Zeng, F. (2004) “Development of a polymer alloy of polystyrene (PS) and polyamide (PA) for building functional part based on selective laser sintering”, *Proc. Instn Mech. Engrs, Part L*, 218, 299-306.

Soonanon, P. e Koomsap, P. (2009) “Towards direct transformation of orthographic-view drawings into a prototype”, *Virtual and Physical Prototyping*, 4, 75-90.

Tolochko, N., Mozzharov, S., Laoui, T. e Froyen, L. (2003) “Selective laser sintering of single- and two-component metal powders”, *Rapid Prototyping Journal*, 9, 68-78.

Volpato, Neri (2001) “Time-saving and accuracy issues in rapid tooling by selective laser sintering”. Tese de Doutoramento. Escola de Engenharia Mecânica. Universidade de Leeds, Reino Unido.

Wah, A.P.K. e Jonejafs, A. (2003) “Geometric techniques for efficient waste removal in LOM”, *Journal of Manufacturing Systems*, 22, 248-263.

Wang, Xiangwei (1999) “Calibration of shrinkage and beam offset in SLS process” *Rapid Prototyping Journal* – Volume 5, Number 3; pp 129-133. MCB UNiversity Perss. ISSN 1355-2546.

Yan, Y., Li, S., Zhang, R., Lin, F., Wu, R., Lu, Q., Xiong, Z. e Wang, X. (2009) “Rapid Prototyping and Manufacturing Technology: Principle, Representative Technics, Applications, and Development Trends”, *Tsinghua Science & Technology*, 14, 1-12.

Yau, H. T., Kuo, C. C. e Yeh, C. H. (2003) “Extension of surface reconstruction algorithm to the global stitching and repairing of STL models”, *Computer-Aided Design*, 35, 477-486.

Anexos

Anexo I

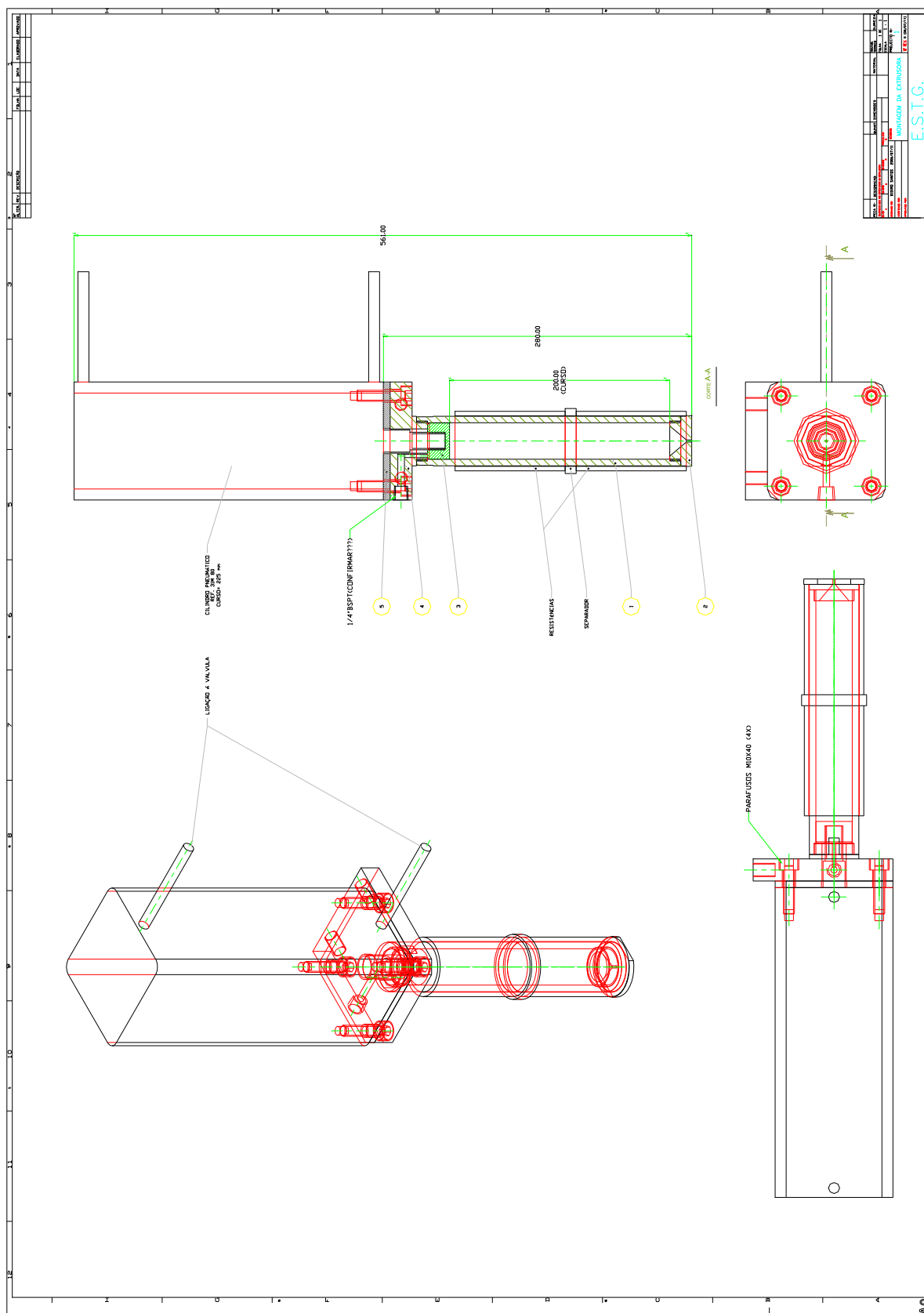


Figura com escala diferente da real.

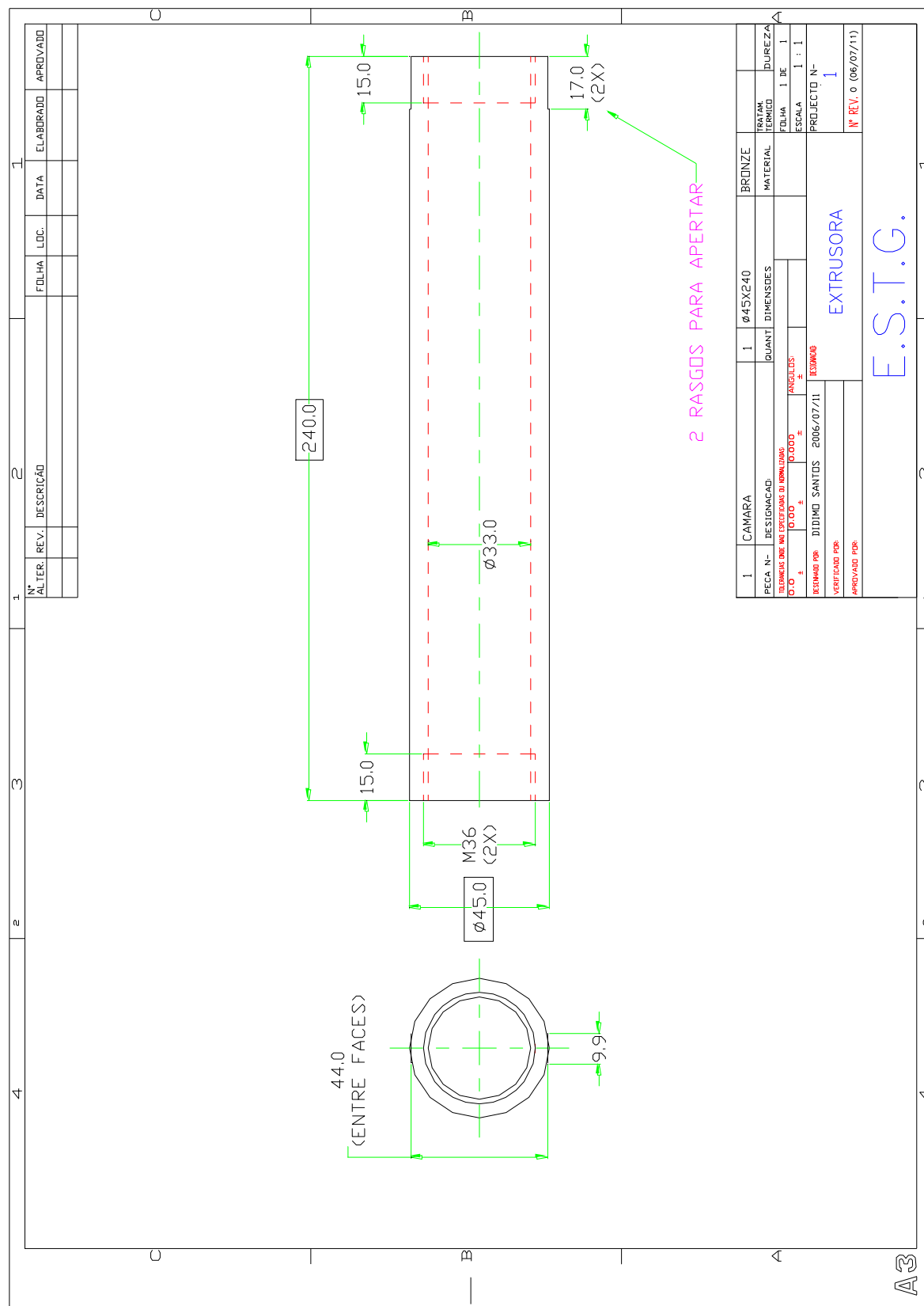


Figura com escala diferente da real.

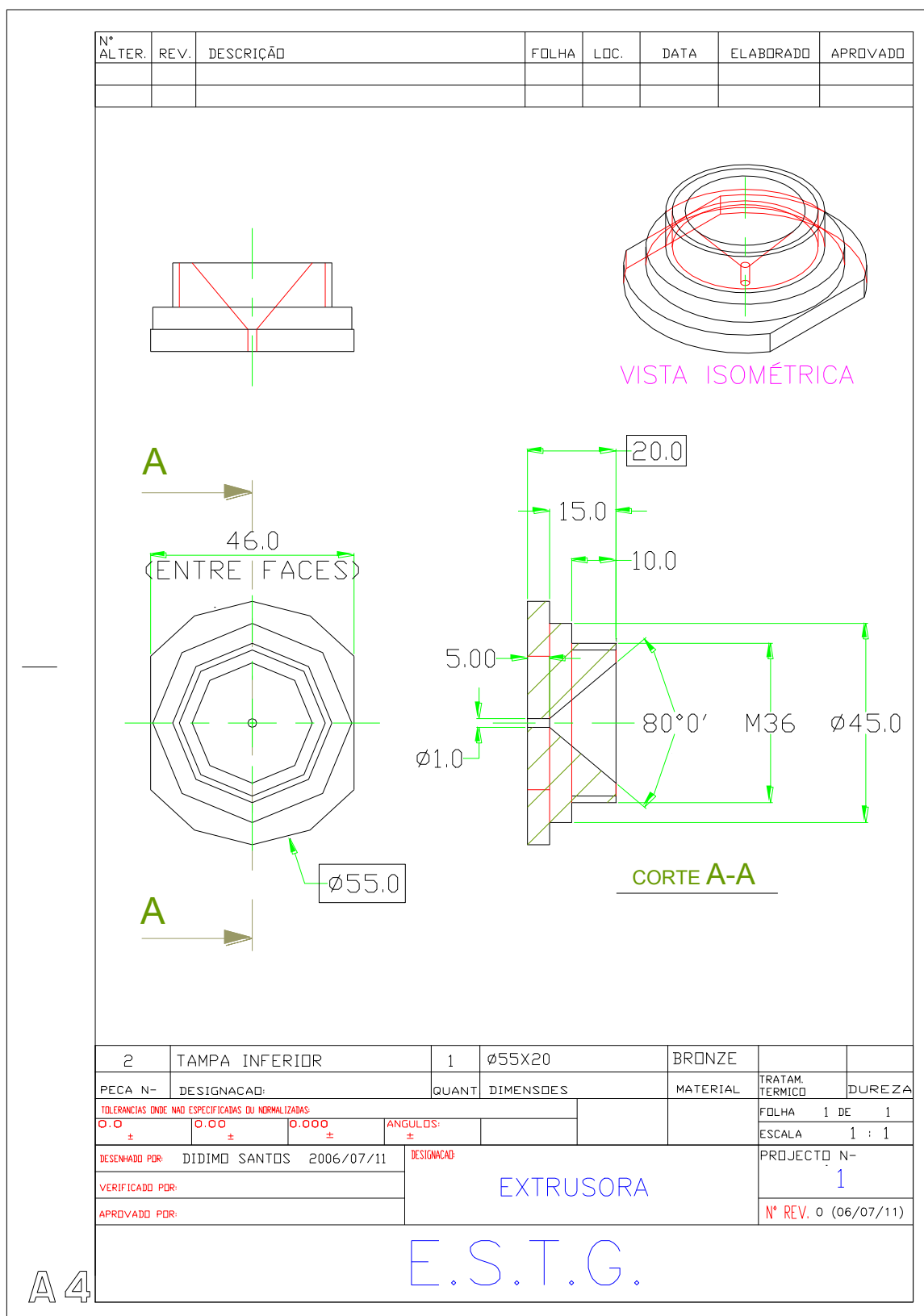


Figura com escala diferente da real.

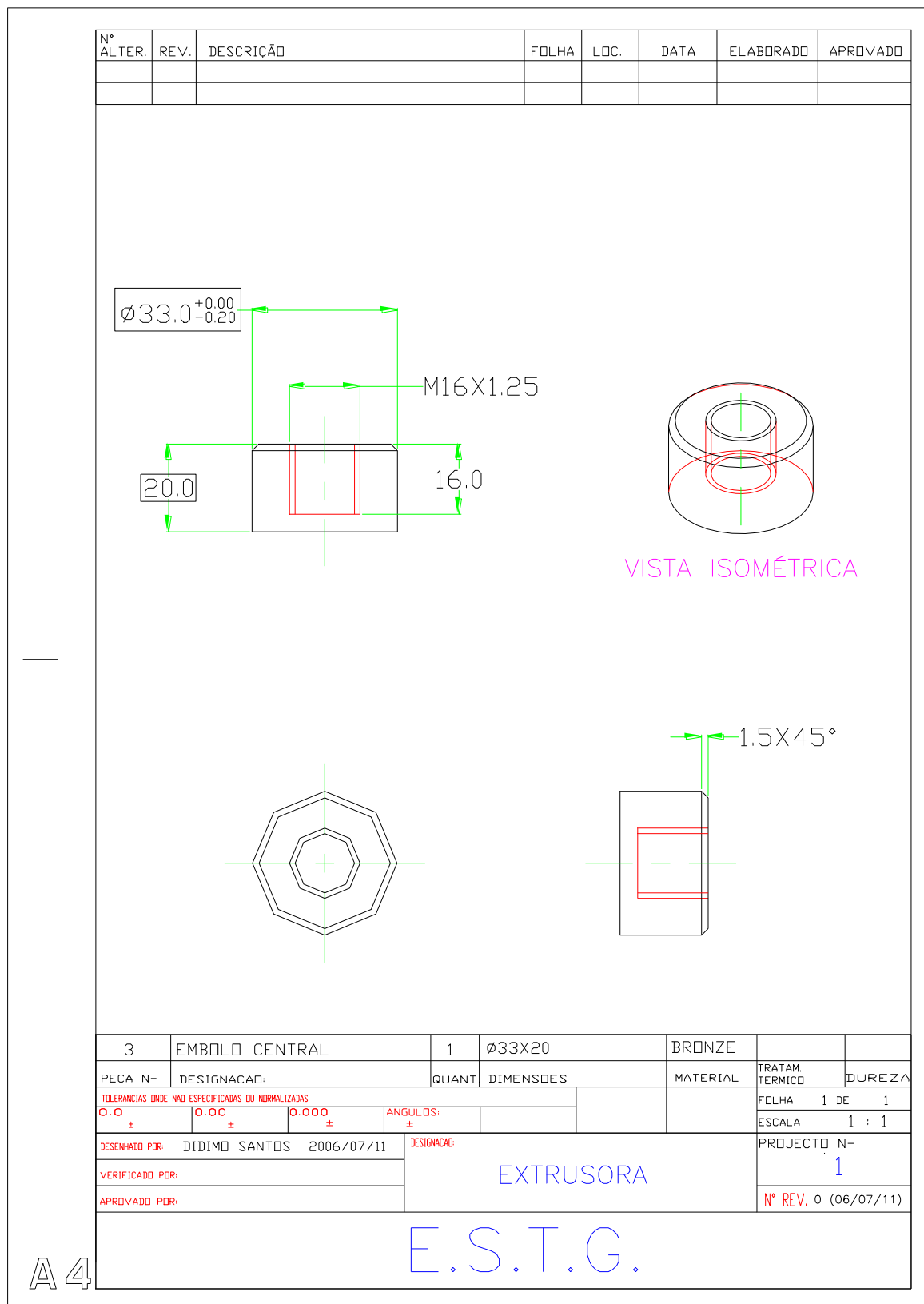


Figura com escala diferente da real.

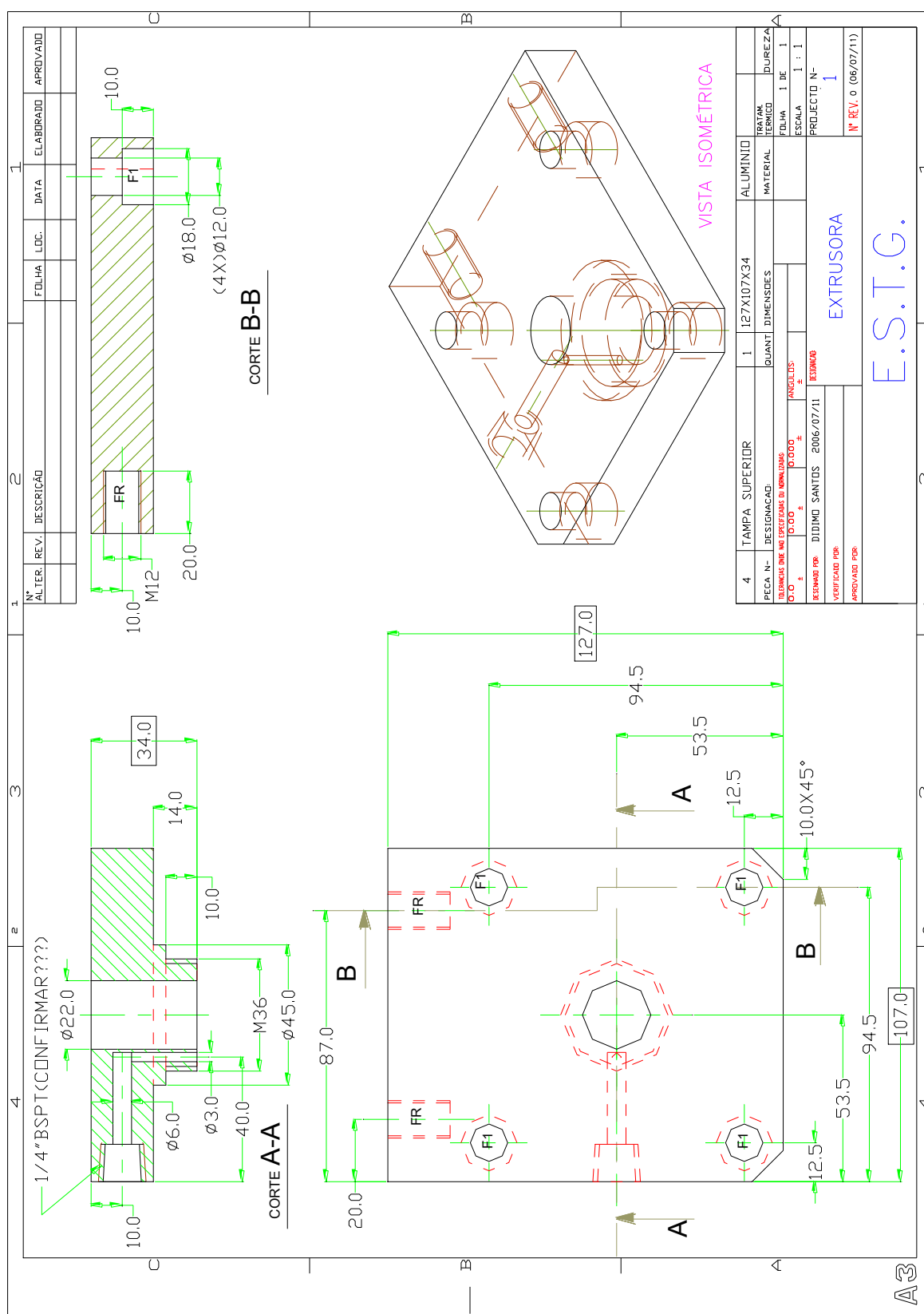


Figura com escala diferente da real.

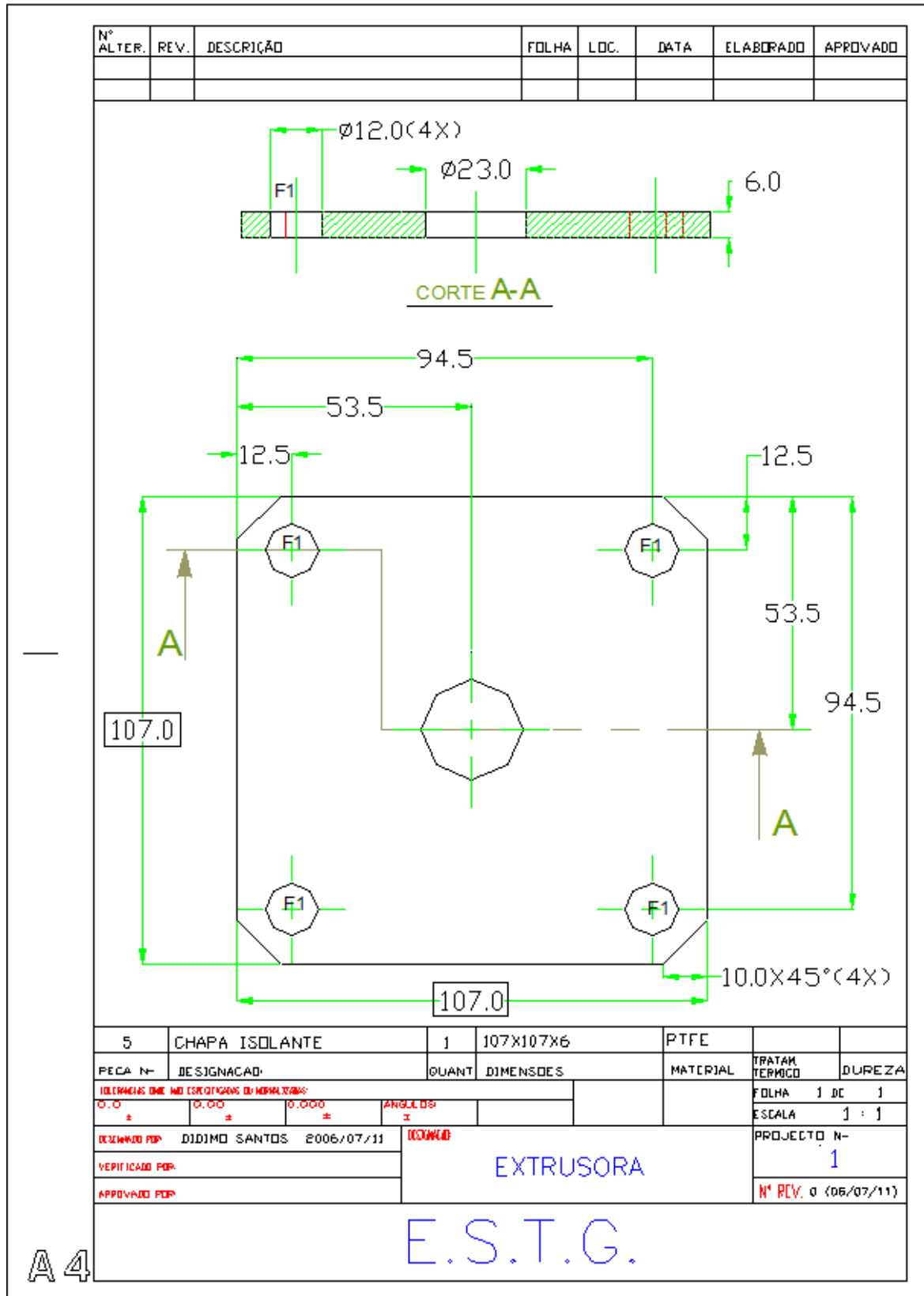


Figura com escala diferente da real.

Anexo II

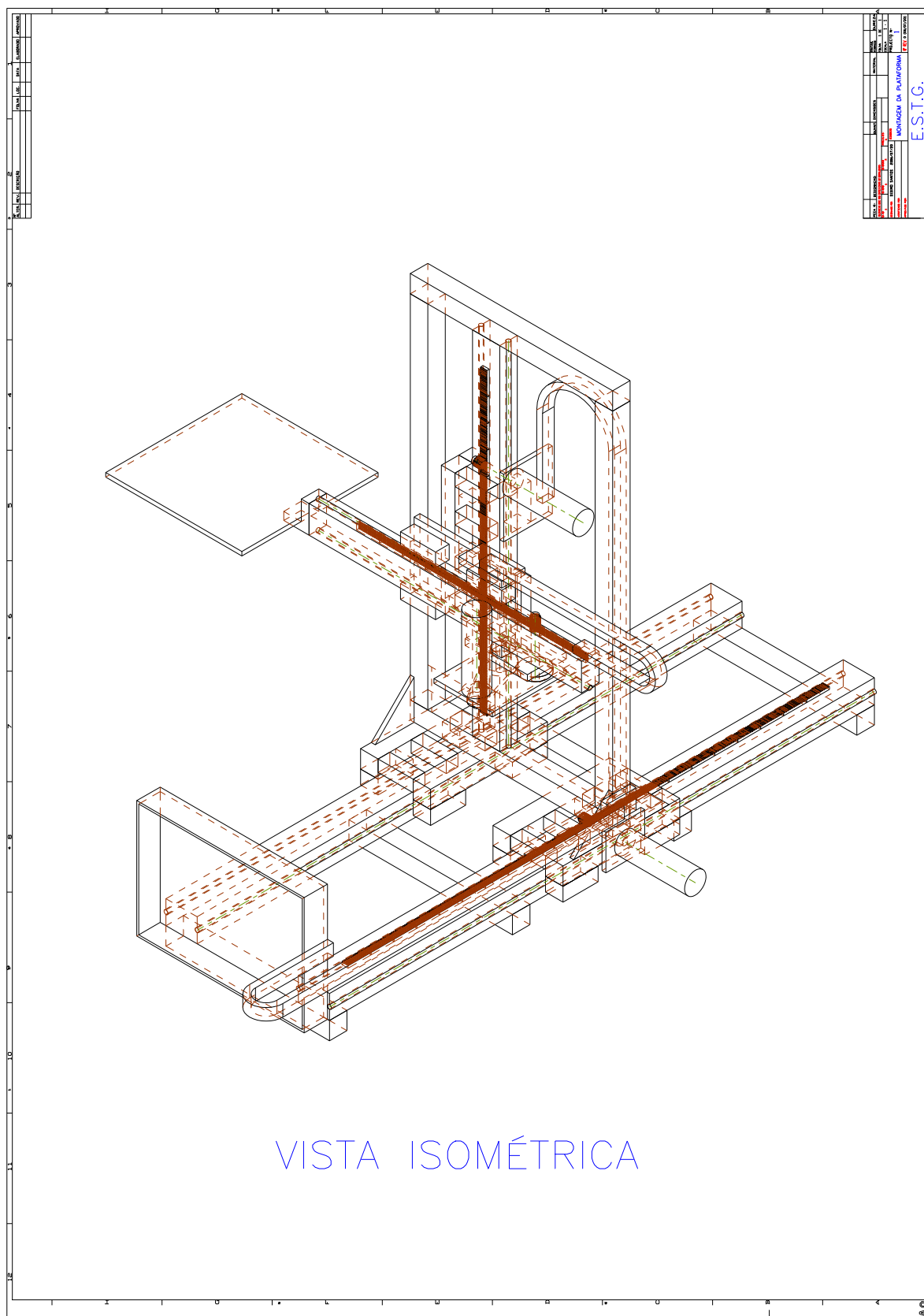
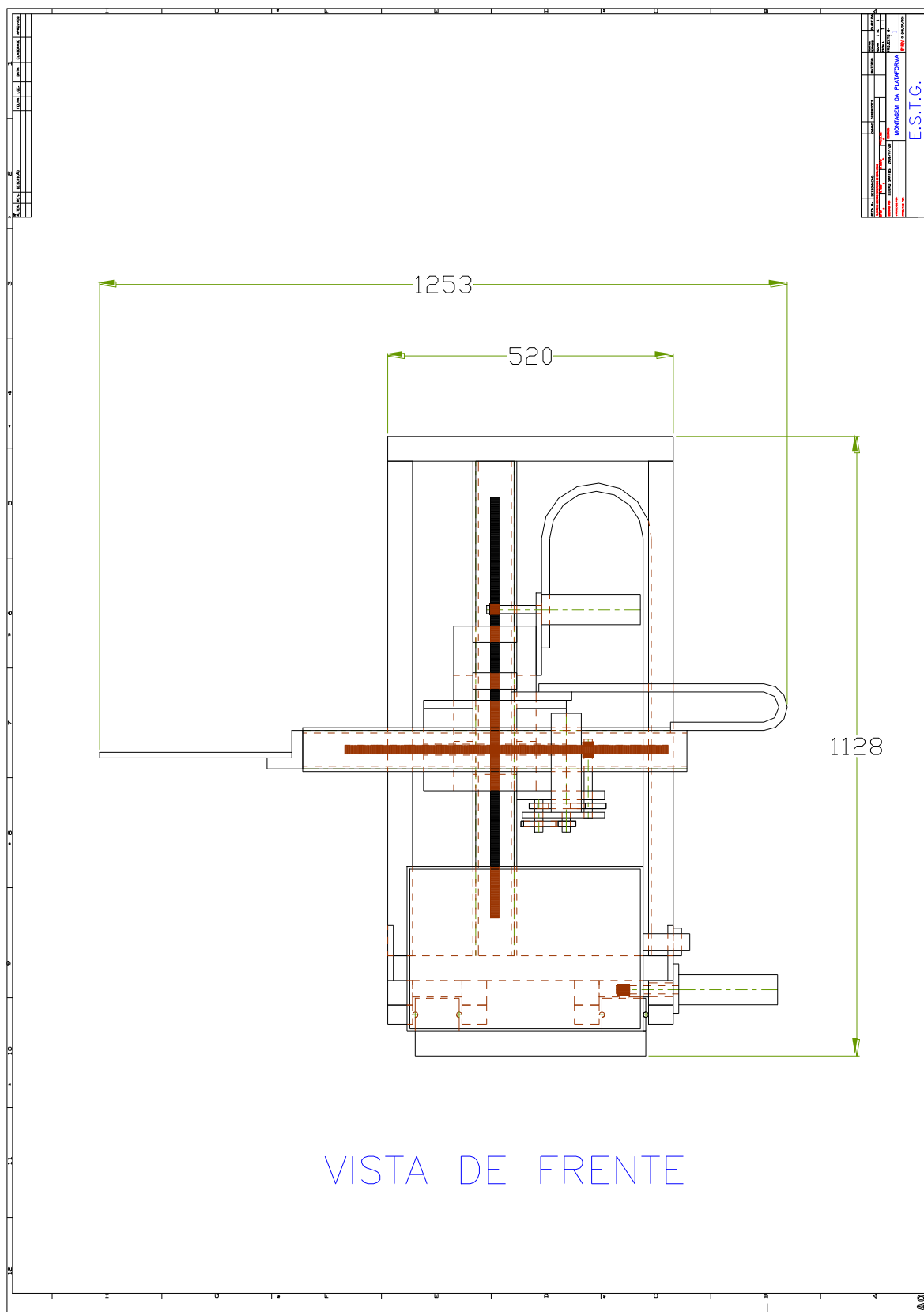


Figura com escala diferente da real.



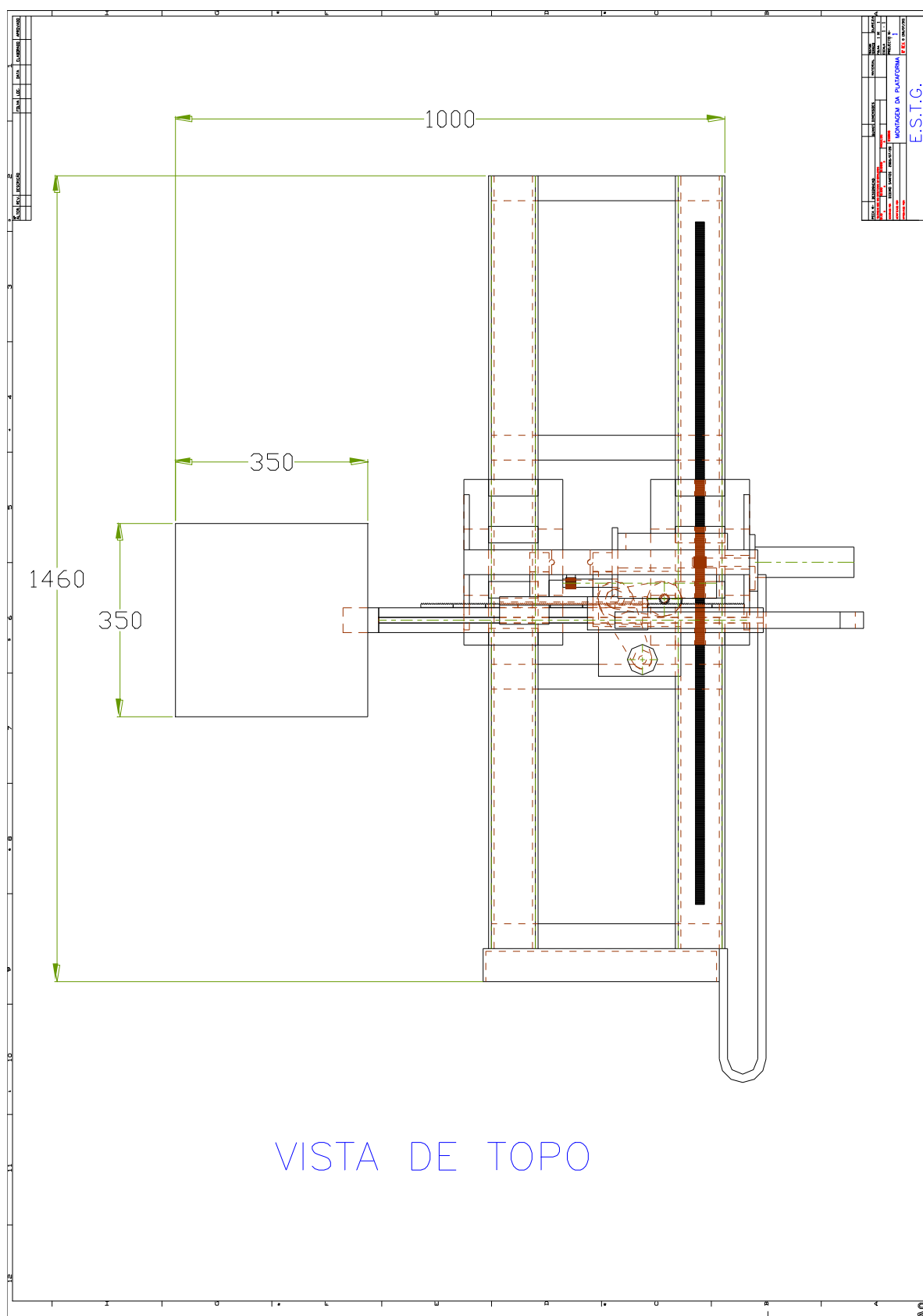


Figura com escala diferente da real.

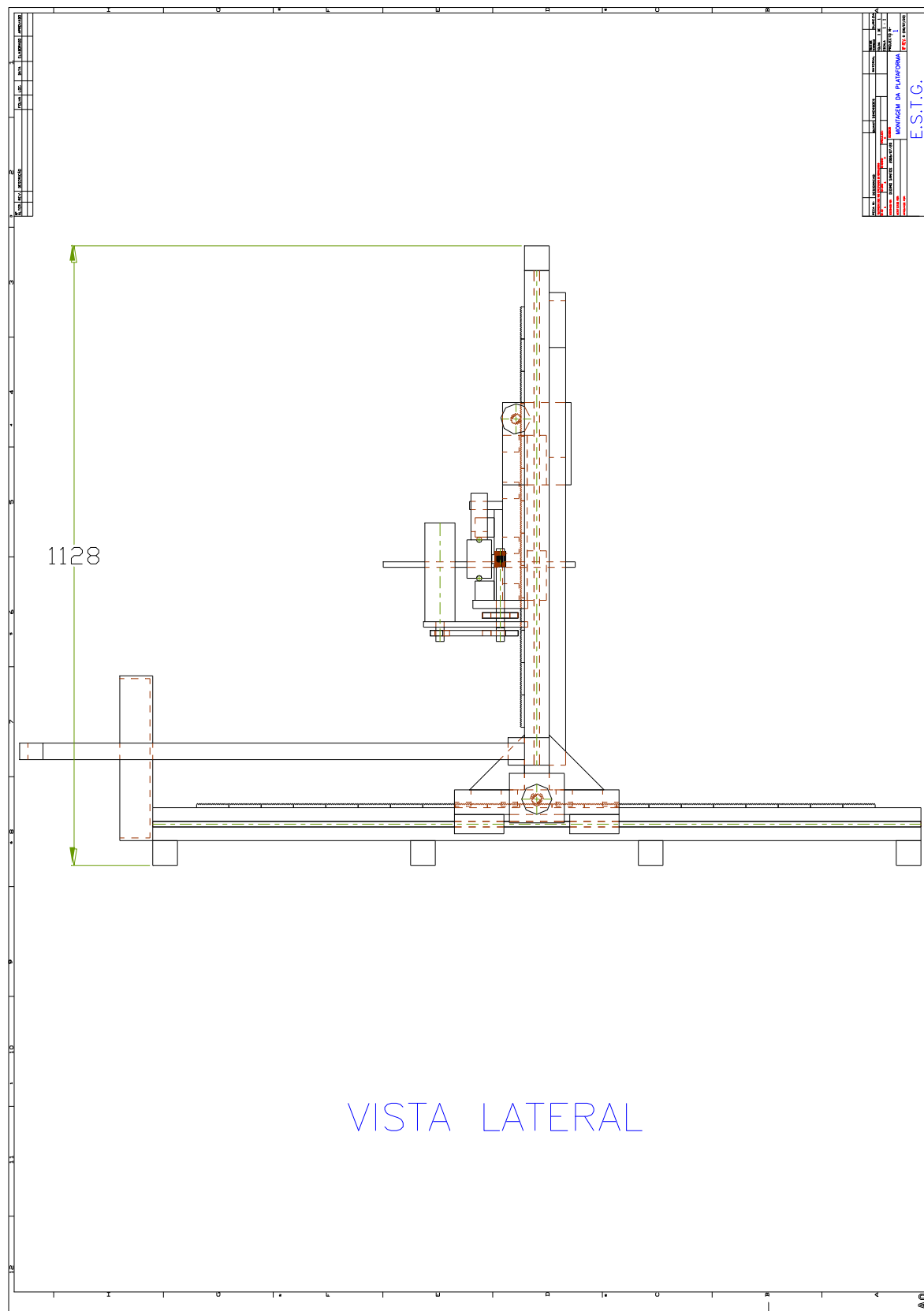


Figura com escala diferente da real.